

洪潮影响下潭江流域安全行洪阈值研究

周 举¹, 陈黎明¹, 胡腾飞¹, 陆 昊¹, 施 勇¹, 韦 诚²

(1. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 为研究洪潮叠加影响下潭江流域下游感潮河段河道洪水演进动态与行洪能力, 构建了一维水动力模型, 通过多组洪潮组合工况模拟计算, 量化了不同潮位、控制水位、持续泄流时间下潭江流域控制性节点安全行洪阈值以及涨落潮情形下的行洪能力, 揭示了洪潮影响下潭江流域水文变化规律, 并结合随机森林模型, 绘制了高精度安全行洪阈值图谱。结果表明: 以潮动力为主的潭江流域下游感潮河段, 干流水位主要受下游潮位影响, 高潮位的洪潮顶托效应更为强烈, 安全行洪阈值受潮位和泄流时间影响; 落潮时段行洪能力较涨潮时段明显增强, 且落潮时段行洪能力与控制断面水位基本呈线性变化。

关键词: 感潮河段; 洪潮叠加; 行洪阈值; 阈值图谱; 潭江流域

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)05-0053-09

Research on safety threshold of flood discharge in the Tanjiang River Basin under impact of floods and tides// ZHOU Ju¹, CHEN Liming¹, HU Tengfei¹, LU Hao¹, SHI Yong¹, WEI Cheng² (1. *Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Water Resources Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China*)

Abstract: To study the dynamics of flood propagation and discharge capacity in the downstream tidal river section of the Tanjiang River Basin under flood and tide overlapping conditions, a one-dimensional hydrodynamic model was constructed to quantify the safety threshold of flow discharge at key control node of the Tanjiang River Basin and flood discharge capacity during tidal cycles under various tidal levels, control water levels, and discharge durations, and reveal the hydrological patterns of the Tanjiang River Basin under combined influences of floods and tides through simulation and calculation in multiple scenarios. Then, a high-precision safe flood discharge threshold map was obtained by using the the random forest model. The results indicate that in the downstream tidal river section of the Tanjiang River Basin dominated by tidal dynamics, the water level in the main channel is primarily affected by downstream tidal level, with the flood-tide backwater effect being more pronounced in high tides, and the safe threshold of flood discharge is affected by both tidal level and discharge duration. The flood discharge capacity in ebb tide period is significantly higher than that in flood tide period, and the flood discharge capacity in ebb tide period generally exhibits a linear variation with the water level of control section.

Key words: tidal river section; overlapping of floods and tides; flood discharge threshold; threshold map; Tanjiang River Basin

感潮河段所在城市常受到潮灾和风暴影响^[1-2], 洪水期间往往出现上游洪水、台风暴雨、天文大潮“三碰头”的现象^[3-5], 极易造成严重的洪涝灾害, 且受涨潮影响, 退水困难。感潮河段水位同时受到径流、潮汐的影响以及区间来水、风暴潮和气象因素等自然因素的共同影响^[6-9], 水位和河道行洪能力呈现相互依赖、随机和突变的特点^[10-12], 准确预报水位和安全行洪阈值显得十分困难。

长期以来, 如何实现对洪水精准预报、长预警期、科学预案、快速预演的“四预”功能, 构建以数字孪生流域为核心的智慧水利体系, 一直是水文水资源领域研究的热点问题^[13-16]。感潮河段洪潮遭遇时空复杂, 河道行洪能力随潮汐波动, 泄洪受涨落潮影响, 难以把握水库闸坝群泄洪时机和泄洪量。国内外许多学者基于动力学过程构建的数值模型^[17-21]和基于完全圣维南方程组建立的考虑潮水

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200304); 广东省水利科技创新项目(2021-08); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y523001); 江苏省卓越博士后计划项目(312260)

作者简介: 周举(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 404426902@qq.com

通信作者: 陈黎明(1983—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水资源、水环境与水生态规划研究。E-mail: lmchen@nhri.cn

顶托影响的河道水位过程预报模型已广泛应用于感潮河段水位计算。但现阶段关于不同量级潮流和洪水共同作用下的水文情势以及不同涨落潮时段水位变化特点的量化研究较少,难以根据相应情形给出定量的安全行洪阈值。

本文通过水动力模型模拟计算潭江流域下游感潮河段水文情势变化,量化各情形下行洪阈值和行洪时机,精细化描述河道防洪控制断面洪水变化规律,并结合随机森林(random forest, RF)模型绘制高精度安全行洪阈值图谱,以期为潭江流域防洪调度精准决策提供科学依据。

1 研究区概况

潭江是珠江三角洲水系的一级支流,流域面积 6026 km²,在江门市境内的流域面积 5882 km²,占江门市总面积的 62%。潭江干流全长 248 km,平均坡降 0.45%。潭江流域概况见图 1,潭江下游从合山水闸以下为感潮区,潮水每日 2 次涨落,属混合型不规则半日潮。潭江流域多发暴雨洪水和台风暴潮,具有洪潮混合的特点,易造成洪涝灾害,流域内河流洪涝灾害造成的损失已成为灾害损失的主体。2018 年 9 月,台风“山竹”强势登陆江门市,造成洪涝灾害,致使 19.65 万人受灾,直接经济损失高达 27.92 亿元,严重影响了区域经济社会的可持续发展。对洪涝灾害进行预报,及时制定各种防洪措施,尽可能减少洪水灾害给下游城镇带来的损失,具有重大的意义。

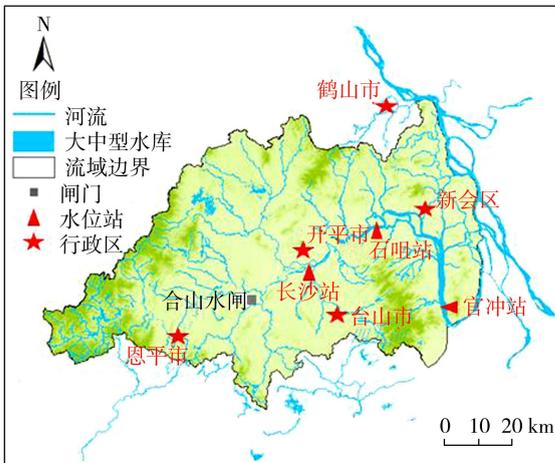


图 1 潭江流域概况

Fig. 1 Overview of the Tanjiang River Basin

潭江流域流量监测数据匮乏,增加了该流域洪水预报的难度。目前流域洪水以经验预报为主,在洪潮叠加组合下精度不足,不适用于极端台风暴潮增水预报。智慧水利建设背景下,迫切需要提升流域防洪调度的智能化、科学化水平。因此,亟待明晰潭江流域洪水传播及洪潮遭遇规律,研究降雨、潮位

结合预报,构建洪潮影响下的安全行洪阈值图谱。

2 研究方法

本文构建了一维水动力模型研究洪水演进过程,演算合山水闸至官冲站段不同洪潮遭遇工况下的水位变化,基于水动力模型的边界条件和计算结果,构建 RF 模型,分析不同洪潮条件下关键控制断面水位与行洪量之间的非线性关系,量化安全行洪阈值,绘制高精度阈值图谱,明确安全行洪流量、行洪时机等。研究的技术框架如图 2 所示。

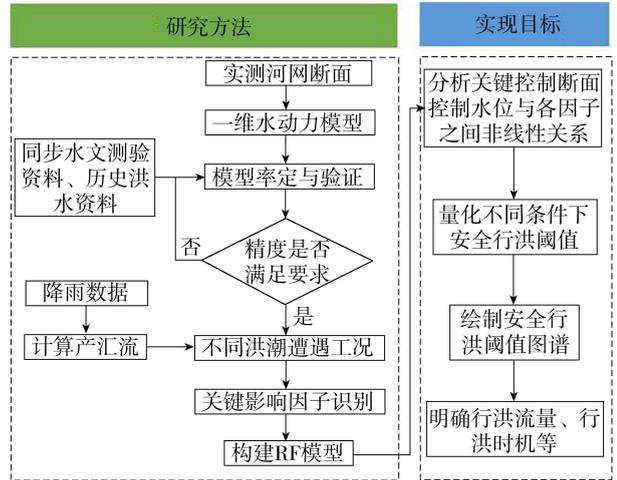


图 2 技术框架

Fig. 2 Technology framework

2.1 水动力模型

2.1.1 模型构建

水动力模型基于一维明渠非恒定流方程,其理论基础是圣维南方程组,包括连续方程和运动方程^[22]。对于一维河道非恒定流的基本方程组,采用 6 点 Abbott-Ionescu 隐式有限差分格式进行离散,模型按照水位、流量、水位顺序交替布置形成计算网格,水位点和流量点计算时间步长相同。

潭江干流上游来水受合山水闸调控,合山水闸以下为感潮区,本文以合山水闸为模型上边界,以官冲站为模型下边界。纳入河网模型的河流有潭江干流的合山水闸至官冲站段、蚬冈水、白沙水、潭江左汊、镇海水、镇海水左汊、曲水、乌水、开平水、花身蚕渠、侨乡水、双桥水、靖村水、茭江、四九河、五十水、新昌水、三八水、公益水、新桥水、址山河、鹤城河、陈冲水道、横海支流、潭江二支汊、下沙河、沙富冲共 27 条,模拟长度 514.6 km,其中潭江干流长度 106.4 km。河道断面根据实测河道地形资料进行概化,概化断面的几何参数包括宽度、深度和河床高程等,使用曼宁公式计算河床糙率系数,实测地形的时间为 2022 年 10 月。潭江干流概化河道断面 213 个,断面间距 0.5 km,其他支流概化河道断面共 423 个,断面间距

3 km。模型河网概化及断面见图 3。

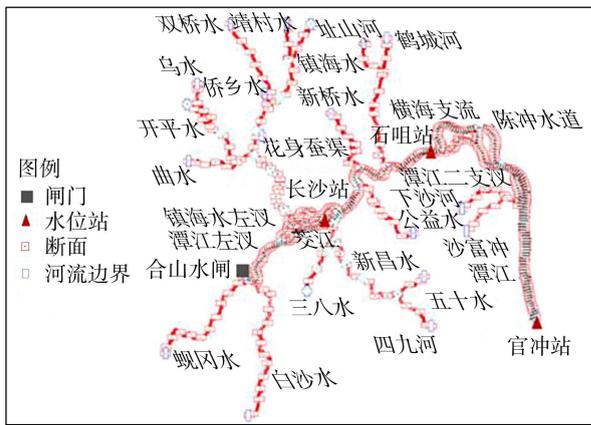


图 3 模型河网概化

Fig. 3 Schematic diagram of model river network generalization

潭江流域的区间降雨产流均为未控区域,在发生洪潮灾害时仅能通过合山水闸调控上游来水。本文重点研究合山水闸泄流对水位的影响,分析满足关键控制断面防洪要求对应的合山水闸安全行洪阈值。考虑到降雨产流对行洪的影响,收集流域多年降雨资料,使用泰森多边形划分 75 个单元计算面雨

量,通过经验模型计算 26 个支流集水区的降雨产流,并将结果作为水动力模型的边界条件。台风暴潮期间使用台风“山竹”的降雨资料,流域总降雨产流最大值为 $3800 \text{ m}^3/\text{s}$,平均降雨产流为 $914 \text{ m}^3/\text{s}$,其余潮型使用 2018 年 9 月平均降雨产流,为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.1.2 模型率定

水动力模型参数主要为河床糙率 n ,本文对不同河段的河床糙率进行设置。以长沙站、石咀站实测资料作为模型率定的参证资料,采用收集到的潭江流域 2022 年 7 月 29—31 日同步水文测验资料进行模型率定(图 4),模拟水位的纳什效率系数(NSE)均超过 0.96,均方根误差(RMSE)均小于 0.1 m,模拟流量的 NSE 均超过 0.90,总体率定效果良好。干流上游断面糙率值率定结果为 0.032,下游末断面为 0.015,上游断面至下游断面糙率值逐渐减小,支流糙率值统一设定为 0.032。

2.1.3 模型验证

采用水动力模型模拟潭江流域 2018 年 9 月 15—17 日台风“山竹”期间的水文过程,结果见图 5。可见,水位的 NSE 超过 0.97,模拟效果较好,

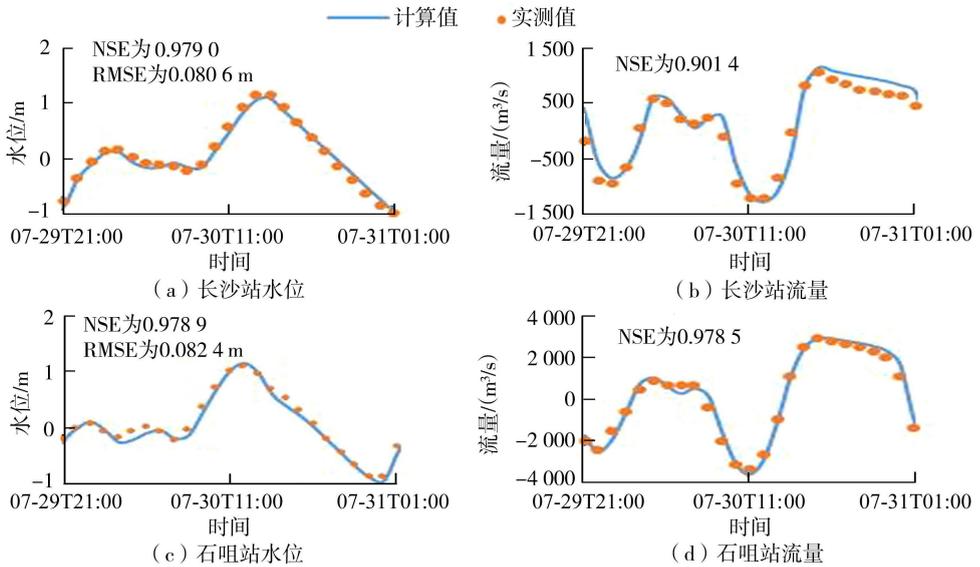


图 4 2022 年 7 月 29—31 日水位和流量率定结果

Fig. 4 Calibration results of water level and flow discharge in Jul. 29 to 31, 2022

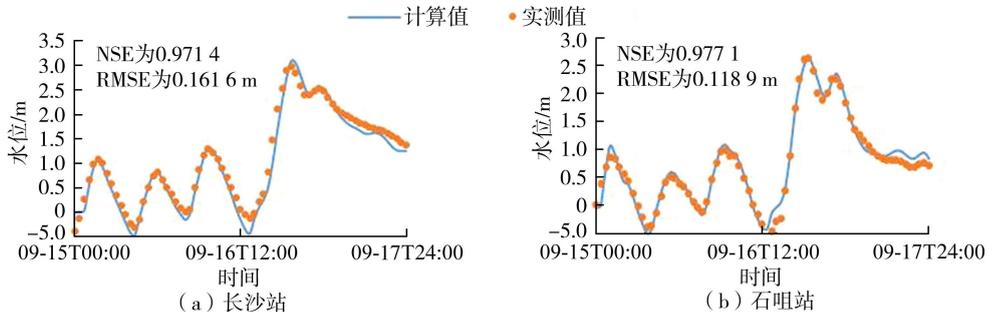


图 5 2018 年 9 月 15—17 日台风“山竹”期间水位验证

Fig. 5 Verification of water level during typhoon "Shanzhu" in Sep. 15 to 17, 2018

可采用该模型进行潭江流域洪水演进研究。

2.2 控制断面与控制水位

根据《广东省江门市流域综合规划修编报告(2005—2030)》,潭江干流沿岸防洪标准按30年一遇设防。由于历史原因长沙站河段没有建设堤防工程,目前采用的警戒水位为2.0 m,防洪标准按5年一遇考虑。选取长沙站、石咀站两个控制断面,根据1976—2021年长沙站和石咀站的实测水位进行频率分析,结果见图6。长沙站、石咀站控制水位分别取2.4 m和2.43 m。本文均采用以珠江基面为基准的高程系。

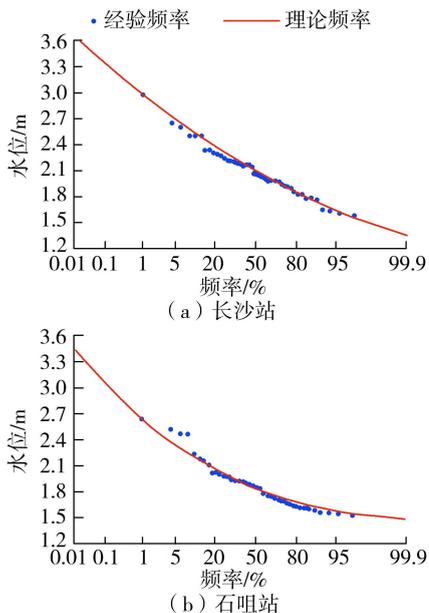


图6 1976—2021年长沙站和石咀站的水位-频率分布
Fig. 6 Water level-frequency distribution at Changsha and Shizui stations from 1976 to 2021

2.3 研究方案设置

在合山水闸不泄流和行洪流量分别为500、1000 m³/s情况下,模拟分析长沙站和石咀站水位变化特点。各情形时间统一设定为2018年7月11日0时至7月15日7时,结果如图7所示,合山水闸行洪流量对长沙站作用较为明显,对石咀站水位影响较小。

潭江流域外海潮汐为不规则半日潮,半个潮周期约6 h,分别考虑合山水闸泄流时间为6、3、2、1 h。选取官冲站5年一遇高潮位2.05 m为天文大潮代表,多年平均高潮位1.77 m为天文中潮代表,最高潮位1.50 m为天文小潮代表。除天文潮影响,潭江还受台风风暴潮影响,选择台风“山竹”期间官冲站最高潮位2.39 m为台风风暴潮代表。代表潮型如图8所示,2018年7月14日各潮型峰值时刻长沙站断面平均流速如图9所示,在高潮位期间,流速均为负值,潮位越高,流速值越大,流向自下游向上,表明高

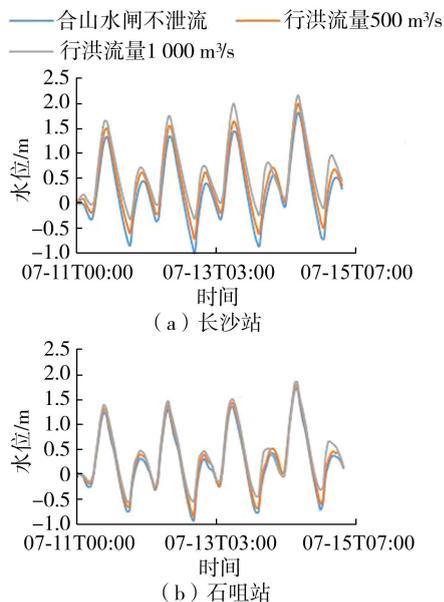


图7 不同下泄流量下两站水位对比
Fig. 7 Comparison of water levels at two stations with different flow discharges

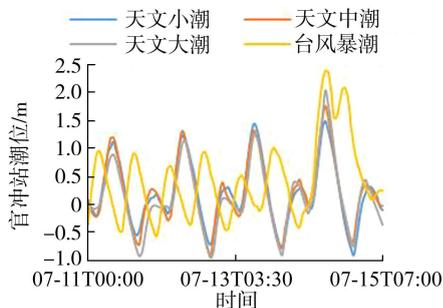


图8 代表潮型

Fig. 8 Tidal representatives

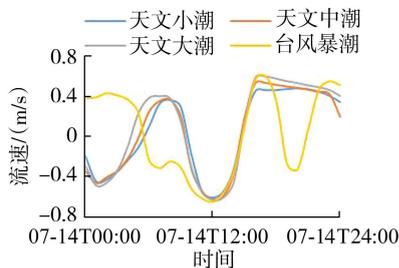


图9 各潮型峰值时刻长沙站断面平均流速
Fig. 9 Average flow velocity at Changsha Station section under peak tidal level for different tidal types

潮位期间河段以潮动力为主。

感潮河段水位同时受洪水与潮水影响,洪水流向自上游向下,潮水流向自下游向上,两者遭遇时相互顶托,造成水位抬升。当洪水峰值与潮水峰值遭遇时,洪、潮流速均急剧减小,动能向势能转化最大,水位抬升最大。经水动力模型模拟,合山水闸下泄洪水1 h到达长沙站,下游潮水3 h上溯至长沙站。为研究安全行洪阈值,取最不利情形,即合山水闸下泄洪水峰值与下游上溯潮水峰值在长沙站相遇。

下游官冲站选择4种代表潮型,长沙站设置警戒水位为2.0 m、防洪控制水位为2.4 m,基于防洪管理经验需求,水位控制间隔取0.1 m,分别模拟计算合山水闸1、2、3、6 h泄流情形下,满足下游防洪安全控制要求的最大安全行洪流量。

2.4 RF 模型

常用于智慧水利的机器学习模型包括长短期记忆(long short-term memory, LSTM)、支持向量机(support vector machine, SVM)、RF 模型等,经对比研究得出 RF 模型对洪潮叠加情形模拟效果最佳。RF 模型每个决策树基于随机抽样训练数据集构建,在构建每个决策树的过程中,每棵树可以捕捉特征子集,随机选择一个特征子集进行特征选择,在每个节点上选择最佳特征进行分割,并通过基尼系数评估变量属性重要性,给出连续变量的分界值。RF 模型通过集成多个决策树的预测结果,减少过拟合风险,并提高模型的泛化能力。对于洪、潮叠加情形,RF 模型可以自动发现和组合特征,捕捉对洪水预测有显著影响的交互特征,模拟洪潮遭遇情形。

使用下游官冲站潮位、长沙站控制水位、泄流时间、区间来水等水动力模型边界条件作为 RF 模型的输入条件,通过影响因子识别和超参数自动寻优构建 RF 模型,输出相应控制条件下合山水闸最大安全行洪流量,绘制合山水闸安全行洪阈值图谱,算法流程如图 10 所示。

3 结果与分析

3.1 涨潮时段安全行洪阈值

根据设定的研究方案,通过水动力模型模拟,计算官冲站各典型潮位情形下,长沙站各控制水位对应的合山水闸安全行洪阈值,即最大安全行洪流量。设定下游官冲站峰值潮位时刻为 2018 年 7 月 14 日 11:00,合山水闸 6 h 泄流时间为 8:00—14:00,3 h 泄流时间为 11:00—14:00,2 h 泄流时间为 12:00—14:00,1 h 泄流时间为 13:00—14:00,洪、潮峰值均在 14:00 到达长沙站。长沙站水位达到 2.4 m 时,石咀站水位均未达到防洪控制水位 2.43 m。

a. 官冲站天文大、中、小潮潮型。图 11 为天文潮情形下长沙站控制水位对应合山水闸安全行洪阈值。从图 11 可以看出,当官冲站潮位一定时,长沙站控制水位和最大安全行洪流量基本呈线性关系,对于不同泄流时间,长沙站控制水位每上升 0.1 m,对应最大安全行洪流量的增加量基本一致,此时水位上升基本受洪水影响。官冲站潮位较低时,各泄流时间最大安全行洪流量每增加 $500 \text{ m}^3/\text{s}$,长沙站水位约上升 0.1 m;当官冲站潮位较高时,各泄流时

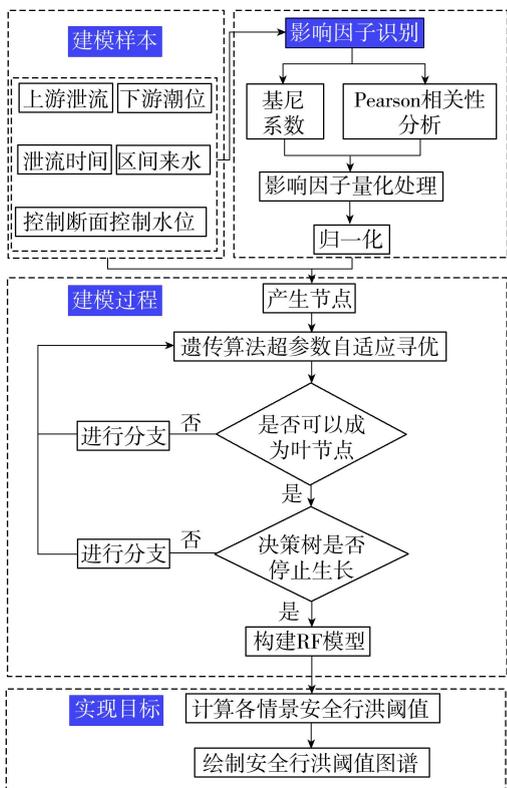


图 10 RF 模型算法流程

Fig. 10 Flow chart for algorithm of RF model

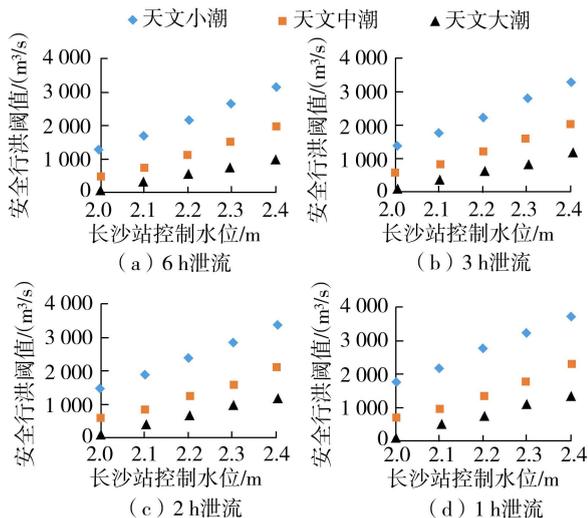


图 11 天文潮情形下涨潮时段合山水闸安全行洪阈值
Fig. 11 Safe flood discharge threshold of Heshan Sluice in flood tide period under astronomical tide conditions

间最大安全行洪流量每增加 $250 \text{ m}^3/\text{s}$,长沙站水位约上升 0.1 m;官冲站低潮位时最大安全行洪流量增长斜率大于高潮位时增长斜率,表明高潮位的顶托作用更为明显。当泄流时间为 1 h 时,不同控制条件下最大安全行洪流量明显大于 6 h 最大安全行洪流量,3 h 最大安全行洪流量与 6 h 差距较小,表明高潮到达前的 3 h,上游泄流对长沙站水位影响较大。

b. 官冲站台风暴潮潮型。2018 年台风“山竹”期间,官冲站最高潮位为 2.39 m,当合山水闸不泄

流时,长沙站、石咀站的峰值水位分别为 2.52、2.44 m,均超出各站最大防洪水位。因此,模拟计算长沙站水位重现期分别为 10、20、30、50、100 a,对应控制水位分别为 2.56、2.70、2.77、2.86、2.97 m 时合山水闸最大安全行洪流量。台风暴潮情形下最大安全行洪流量变化趋势与天文大、中、小潮情形下有所区别,台风暴潮情形下最大安全行洪流量随控制水位的提升呈抛物线式增长,如图 12 所示。当下游潮位很高时,洪潮顶托剧烈,稍有泄流就会引起长沙站的水位增长,直至水位抬升至 2.86 m 后洪潮顶托影响才逐渐减弱。

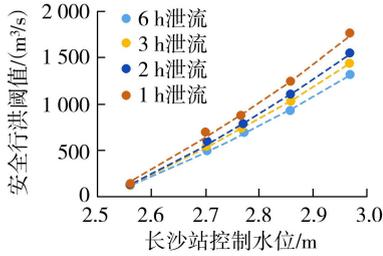


图 12 台风暴潮情形下涨潮时段合山水闸安全行洪阈值
Fig. 12 Safe flood discharge threshold of Heshan Sluice in flood tide period under typhoon storm surge condition

3.2 落潮时段安全行洪阈值

为研究落潮对行洪能力的影响,同样分天文大、中、小潮和台风暴潮 4 种典型潮型进行分析。设定合山水闸 6 h 泄流时间为 2018 年 7 月 14 日 14:00—20:00,3 h 泄流时间为 14:00—17:00,2 h 泄流时间为 14:00—16:00,1 h 泄流时间为 14:00—15:00。

a. 官冲站天文大、中、小潮潮型。天文潮情形下落潮时段合山水闸安全行洪阈值计算结果如表 1 所示。合山水闸设计最大过闸流量为 4972 m³/s,大于此流量情形不再计算。从表 1 可以看出,泄流时间为 2 h 及以上,最大安全行洪流量结果一致。从图 8 可以看出,落潮 3 h 后官冲站潮位明显下降,此阶段泄流对控制断面峰值水位影响较小。各潮型落潮情况下行洪能力均增加明显,且呈现一定规律性,

表 1 天文潮情形下落潮时段合山水闸安全行洪阈值
Table 1 Safe flood discharge threshold of Heshan Sluice in ebb tide period under astronomical tide conditions

天文潮型	长沙站控制水位/m	安全行洪阈值/(m ³ /s)			
		泄流 6h	泄流 3h	泄流 2h	泄流 1h
小潮	2.0	5000	5000	5000	5250
	2.0	2500	2500	2500	2750
中潮	2.1		3600	3600	3900
	2.2		4800	4800	5100
大潮	2.0	400	400	400	400
	2.1	1450	1450	1450	1650
	2.2	2400	2400	2400	2650
	2.3	3500	3500	3500	3750
	2.4	4600	4600	4600	4850

最大安全行洪流量每增加 1000 m³/s,长沙站控制水位约上升 0.1 m。

b. 官冲站台风暴潮潮型。为研究台风暴潮情况下落潮时段行洪能力,模拟计算官冲站台风暴潮情形下,长沙站各控制水位对应的最大安全行洪流量。涨落潮时段合山水闸 2 h 泄流时间安全行洪阈值对比见表 2,与涨潮时段 2 h 泄流时间的最大安全行洪流量对比,长沙站各控制水位落潮时段 2 h 泄流时间的最大安全行洪流量明显增大,且同样满足最大安全行洪流量每增加 1000 m³/s,长沙站水位约上升 0.1 m(表 2)。与涨潮时段对比,落潮时段行洪流量增加,石咀站对应最高水位维持不变。

表 2 涨落潮时段合山水闸 2 h 泄流安全行洪阈值对比
Table 2 Comparison of safe flood discharge thresholds of Heshan Sluice with 2 h discharge duration in flood tide and ebb tide periods

长沙站控制水位/m	潮位重现期/a	安全行洪阈值/(m ³ /s)		石咀站最高水位/m	
		涨潮时段	落潮时段	涨潮时段	落潮时段
2.56	10	125	200	2.45	2.45
2.70	20	600	1300	2.47	2.45
2.77	30	775	1950	2.50	2.45
2.86	50	1100	2850	2.52	2.45
2.97	100	1550	4050	2.57	2.45

3.3 安全行洪阈值图谱

3.3.1 长沙站水位影响因素

感潮河段水位受多种因素影响,分析长沙站水位与下游官冲站潮位和上游合山水闸行洪流量之间的 Pearson 相关系数(r),并绘制散点图。由图 13、14 可知,长沙站水位与官冲站潮位间呈现强正相关性,且随着官冲站最高潮位上升,相关性增强;合山水闸行洪流量与长沙站水位的相关性随着官冲站最高潮位的上升而减弱,表明潭江干流感潮河段的水位主要受潮动力影响。由长沙站水位与合山水闸行洪流量关系分析可知,当官冲站为天文潮时,合山水闸行洪流量增加导致长沙站水位上升的变化趋势基本一致;当官冲站为台风暴潮时,随着合山水闸行洪流量的减小,长沙站水位降低并不明显,下游退水困难。

3.3.2 安全行洪阈值图谱绘制

将天文大、中、小潮型和台风暴潮期间的各控制边界数据和控制断面的相应数据作为训练样本(图 15(a)),对 2018 年 9 月 15—17 日台风“山竹”期间长沙站水位进行模型验证,验证结果显示,RF 模型可以很好地反映关键控制断面长沙站水位变化情势(图 15(b))。对长沙站 2.4 m 控制水位下合山水闸 6 h 最大安全行洪流量进行验证,结果表明,RF 模型计算的合山水闸安全行洪阈值结果与水动力模

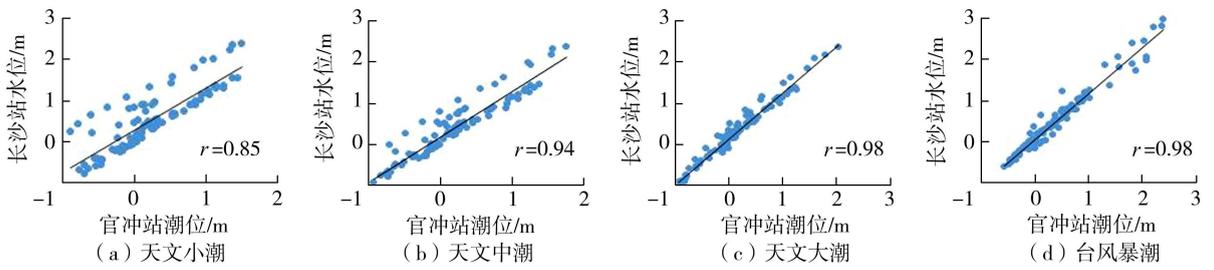


图 13 长沙站水位与官冲站潮位的相关性

Fig. 13 Correlation between water level at Changsha Station and tidal level at Guanchong Station

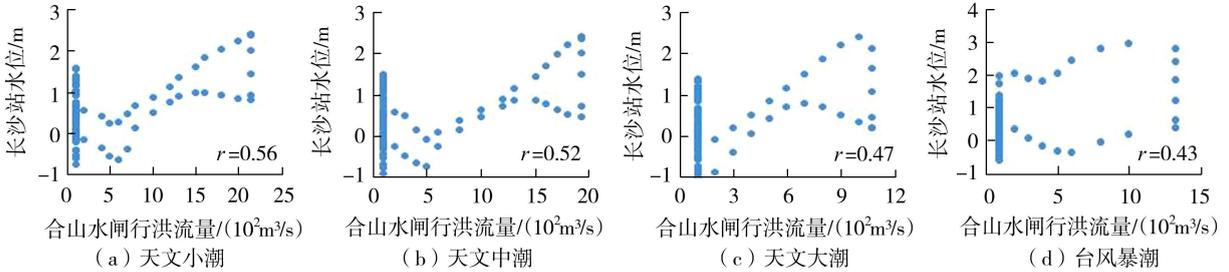


图 14 长沙站水位与合山水闸行洪流量的相关性

Fig. 14 Correlation between water level at Changsha Station and flood discharge at Heshan Sluice

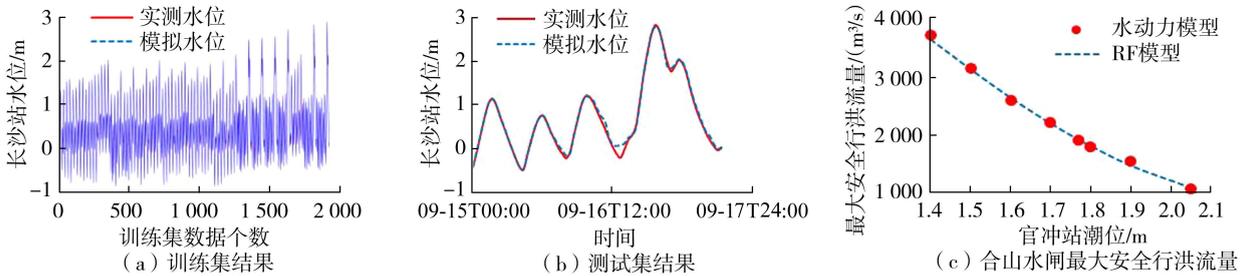


图 15 RF 模型学习验证结果

Fig. 15 RF model learning and testing results

型计算的结果基本一致(图 15(c)),可以用于安全行洪阈值图谱绘制。

安全行洪阈值图谱如图 16 所示。官冲站潮位和长沙站控制水位分别以 0.01 m 形成条件网格矩阵,以此为输入条件,根据 RF 模型模拟预测结果,求解不

满足关键控制断面长沙站防洪要求的合山水闸

安全行洪阈值/(m³/s)

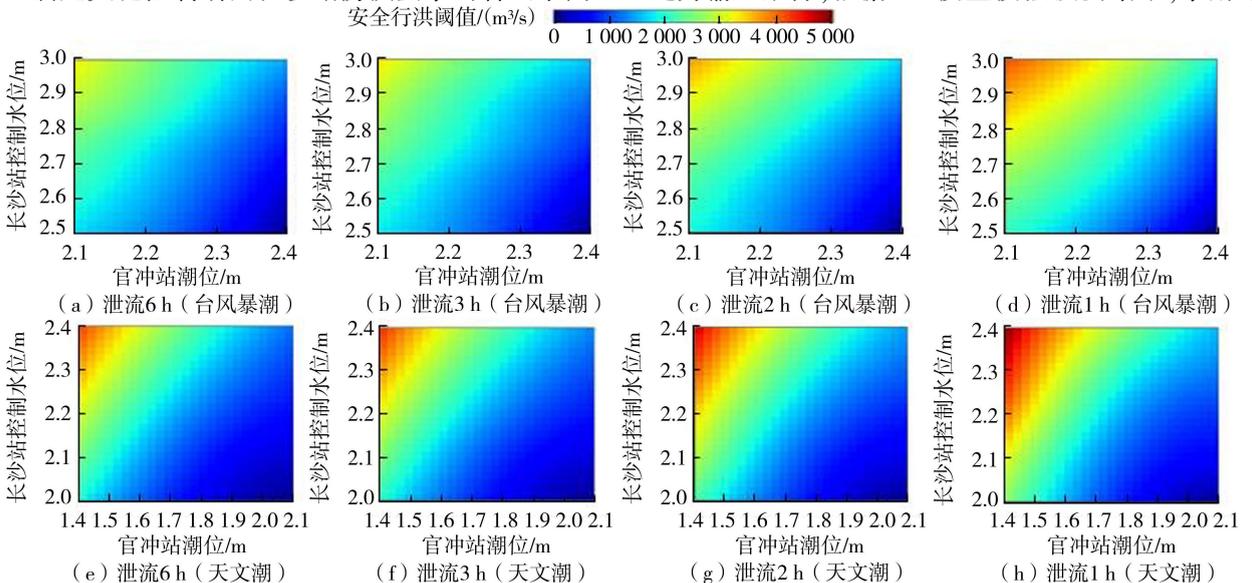


图 16 合山水闸安全行洪阈值图谱

Fig. 16 Safe flood discharge threshold map of Heshan Sluice

同控制条件下合山水闸安全行洪阈值,形成阈值图谱。该图谱的精度高达 0.01 m,覆盖了潭江流域不同下游潮位情形下,不同关键控制断面控制水位条件、不同泄流时间对应的上游安全行洪阈值,可以为流域防洪调度决策提供科学依据。

4 结 论

a. 潭江流域是以潮动力为主的感潮河段,干流水位主要受下游潮位影响。涨潮期间控制断面水位峰值前 3 h 内的合山水闸行洪对水位影响较为明显,3 h 外的行洪对水位影响较小;落潮时段前 2 h 内的行洪对水位影响较为明显,2 h 外的行洪对水位影响较小。

b. 当下游潮位一定时,干流控制断面长沙站水位每上升 0.1 m,对应最大安全行洪流量增加量基本一致,受泄流时间的影响较小。涨潮时段,下游潮位较低时,控制断面水位每上升 0.1 m,对应的最大安全行洪流量增加量明显大于下游高潮位情形,高潮的洪潮顶托效应更为明显。落潮时段行洪能力较涨潮时段明显增强,且落潮时段行洪能力与控制断面水位基本呈线性变化。

c. 利用水动力模型量化潭江流域典型洪潮遭遇情形下的安全行洪阈值,通过机器学习手段,建立安全行洪阈值与下游潮位、泄洪时间、控制水位等因素之间的响应关系,可构建潭江流域高精度安全行洪阈值图谱。该方法具有普适性,可为类似感潮河段地区的洪潮灾害防治和水利工程调度提供参考。

参考文献:

[1] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):10-14. (XU Zongxue, REN Meifang, CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 10-14. (in Chinese))

[2] 陈文龙,马志鹏,袁菲,等. 粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究[J]. 水资源保护,2023,39(1):22-31. (CHEN Wenlong, MA Zhipeng, YUAN Fei, et al. Theoretical framework of water security collaborative regulation and control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 22-31. (in Chinese))

[3] 赵思聪,杜冬月,孙佳龙,等. 奉化江感潮河段水文变化特征分析[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版),2021,30(3):19-24. (ZHAO Sicong, DU Dongyue, SUN Jialong, et al. Analysis on hydrological variation characteristics of tidal reach of Fenghua River[J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition),

2021,30(3):19-24. (in Chinese))

[4] 彭慧,刘璐,姜钧耀,等. 感潮河段上游洪水与河口潮位遭遇研究[J]. 人民黄河,2021,43(8):44-47. (PENG Hui, LIU Lu, JIANG Junyao, et al. Research on encounter of floods and tides in the tidal watercourse [J]. Yellow River, 2021, 43(8): 44-47. (in Chinese))

[5] 刘曾美,覃光华,陈子桑,等. 感潮河段水位与上游洪水和河口潮位的关联性研究[J]. 水利学报,2013,44(11):1278-1285. (LIU Zengmei, QIN Guanghua, CHEN Zisheng, et al. Study on the correlation of the water level of the tidal river with upstream flood and estuary tide level [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1278-1285. (in Chinese))

[6] AUSTIN T P, VILA-CONCEJO A, SHORT A D, et al. A multi-scale conceptual model of flood-tide delta morphodynamics in micro-tidal estuaries[J]. Geosciences, 2018,8(9):324.

[7] 刘曾美,王尚伟,蔡玉婷,等. 感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律[J]. 水资源保护,2021,37(2):89-94. (LIU Zengmei, WANG Shangwei, CAI Yuting, et al. Coincidence rules of rainfall in waterlogging area of tide-affected area and upstream flood in flood area of drainage receiver [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 89-94. (in Chinese))

[8] 罗志发,黄本胜,邱静,等. 粤港澳大湾区区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护,2022,38(3):72-79. (LUO Zhifa, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 72-79. (in Chinese))

[9] 胡义明,梁忠民,姚轶,等. 变化环境下洪峰-洪量组合设计值计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):492-498. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, YAO Yi, et al. Calculation method of design value combination of flood peak and flood volume under changing environment [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 492-498. (in Chinese))

[10] 鲍志伟. 鸭绿江感潮河段行洪能力分析 & 预报方法研究[J]. 水利规划与设计,2021(5):90-93. (BAO Zhiwei. Flood discharge capacity analysis and forecast method study of Yalujiang river tidal reach [J]. Water Resources Planning and Design, 2021(5): 90-93. (in Chinese))

[11] 廖庭庭,陈明杏. 闽江下游感潮河段特征点水动力机制研究[J]. 人民珠江,2020,41(11):9-15. (LIAO Tingting, CHEN Mingxing. Study on hydrodynamic mechanism of feature points in tidal reach of lower Minjiang River [J]. Pearl River, 2020, 41(11): 9-15. (in Chinese))

[12] 吕小帅,沈小勤. 椒(灵)江流域洪潮遭遇规律分析

- [J]. 水力发电, 2022, 48(7): 13-15. (LYU Xiaoshuai, SHEN Xiaoqin. Analysis for flood-tide encounter law in Jiao (Ling) Jiang River Basin[J]. Water Power, 2022, 48(7): 13-15. (in Chinese))
- [13] 杨莉玲, 杨芳, 余顺超, 等. 感潮河网区风暴潮洪水风险模拟研究: 以中顺大围为例[J]. 人民珠江, 2018, 39(8): 4-8. (YANG Liling, YANG Fang, YU Shunchao, et al. Study on simulation of storm surge flood risk in tidal river network area: take the Zhongshun protection zone as an example [J]. Pearl River, 2018, 39(8): 4-8. (in Chinese))
- [14] ZAHURA F T, GOODALL J L, SADLER J M, et al. Training machine learning surrogate models from a high-fidelity physics-based model: application for real-time street-scale flood prediction in an urban coastal community [J]. Water Resources Research, 2020, 56(10): e2019WR027038. .
- [15] BOMERS A, VAN DER MEULEN B, SCHIELEN R M J, et al. Historic flood reconstruction with the use of an artificial neural network [J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 9673-9688.
- [16] ZHOU Yanlai, CUI Zhen, LIN Kangling, et al. Short-term flood probability density forecasting using a conceptual hydrological model with machine learning techniques [J]. Journal of Hydrology, 2022, 604: 127255.
- [17] AMINI A, DOLATSHAHI M, KERACHIAN R. Adaptive precipitation nowcasting using deep learning and ensemble modeling [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128197.
- [18] LI Fangfang, WANG Zhiyu, QIU Jun. Long-term streamflow forecasting using artificial neural network based on preprocessing technique [J]. Journal of Forecasting, 2019, 38(3): 192-206.
- [19] 徐振山, 王苏东, 丁宏伟, 等. 基于数值模拟的澄通感潮河段水源地预警站设置研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 61-69. (XU Zhenshan, WANG Sudong, DING Hongwei, et al. Study on setup of early warning station in Chengtong tidal reach based on numerical simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(4): 61-69. (in Chinese))
- [20] 沈红丽, 高成. 基于 MIKE11 和 AHP 法的感潮河段防洪潮方案研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 36-41. (SHEN Hongli, GAO Cheng. Research on flood tide control planning of tidal river based on MIKE11 model and AHP [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(1): 36-41. (in Chinese))
- [21] 陈珺, 黄燕华, 洪朋, 等. 基于机器学习模型的河道水位预测 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 9-14. (CHEN Jun, HUANG Yanhua, HONG Peng, et al. Prediction of river water level based on machine learning model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 9-14. (in Chinese))
- [22] 伍宁. 一维圣维南方程组在非恒定流计算中的应用 [J]. 人民长江, 2001, 32(11): 16-18. (WU Ning. Application of one dimensional Saint-Venant equations in non-constant flow [J]. Yangtze River, 2001, 32(11): 16-18. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-12-12 编辑: 施业)

(上接第 45 页)

- [24] 周金龙, 董新光, 陈文娟, 等. 应用彭曼-蒙特斯公式计算天山北坡平原区水面蒸发量 [J]. 新疆农业大学学报, 2002, 25(4): 35-38. (ZHOU Jinlong, DONG Xinguang, CHEN Wenjuan, et al. Calculation of water surface evaporation in the plain area of the northern slope Tianshan Mountains by Penman-Monteith formula [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2002, 25(4): 35-38. (in Chinese))
- [25] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 28-36. (in Chinese))
- [26] 陈燕飞, 熊刚, 刘伟. 基于标准化降水指数的汉江流域干旱时空分布特征 [J]. 中国农村水利水电, 2016(4): 82-88. (CHEN Yanfei, XIONG Gang, LIU Wei. Drought temporal and spatial distribution of Hanjiang River Basin based on the standardized precipitation index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(4): 82-88. (in Chinese))
- [27] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近 60 年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识 [J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1333-1340. (YANG Jinhua, ZHANG Qiang, WANG Jinsong, et al. Extreme and persistent feature of drought and flood of southwest China in past 60 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1333-1340. (in Chinese))
- [28] 张璐, 卢一杰, 张增信, 等. 南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇风险评估 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1148-1157. (ZHANG Lu, LU Yijie, ZHANG Zengxin, et al. Risk assessment of drought in the source and receiving areas of the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1148-1157. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-01-25 编辑: 施业)