

基于水文水动力耦合模拟的赣江尾闾地区 径流顶托规律研究

宗思远^{1,2}, 许 栋^{1,2}, 李彬权¹, 张 亮³, 孟 锐³, 肖 洋⁴, 冉启华^{1,2}

(1. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室; 2. 河海大学水利水电学院;
3. 江西省赣抚尾闾整治有限公司; 4. 苏州科技大学环境科学与工程学院)

摘要:为揭示赣江尾闾地区径流顶托的时空演变规律及影响因素,构建了适用于平原河网区的水文产流模型,并与自主研发的二维水动力模型进行时空耦合,采用耦合模型模拟了赣江尾闾地区径流顶托规律,并依据模拟结果,基于多元回归分析构建了水位差预测模型。结果表明:赣江尾闾河段的顶托效应与外洲站流量密切相关,低流量时北支壅水抬升南昌站水位,流量增大时主支螺旋流向下游扩展,在昌邑站至南昌站间形成顶托;当流量超过临界值 $513\text{ m}^3/\text{s}$ 时,鄱阳湖水位高于赣江尾闾,鄱阳湖开始顶托赣江,当流量继续增大至 $3211\text{ m}^3/\text{s}$ 时,不再发生顶托现象,东河、西河分流趋于稳定;降雨产流影响顶托产生和消落的演进过程,阻滞作用达 $12\%\sim 19\%$;引入降雨产流量修正项后,水位差预测模型的预测精度有所提升。

关键词:径流顶托;水位差;水文水动力耦合模型;多元回归分析;赣江尾闾地区

Study on backwater effect of runoff in lower reaches of the Ganjiang River based on hydrological and hydrodynamic coupling simulation//Zong Siyuan^{1,2}, Xu Dong^{1,2}, Li Binqun¹, Zhang Liang³, Meng Rui³, Xiao Yang⁴, Ran Qihua^{1,2} (1. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Jiangxi Ganfu Tail-reach Regulation Co., Ltd.; 4. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology)

Abstract: To reveal the spatiotemporal evolution patterns and influencing factors of backwater effect of runoff in the lower reaches of the Ganjiang River, a hydrological runoff model suitable for plain river network areas was constructed and spatiotemporally coupled with a self-developed two-dimensional hydrodynamic model. The coupled hydrological-hydrodynamic model was adopted to simulate the backwater effect in the lower reaches of the Ganjiang River. Based on the simulation results, a water level difference prediction model was further established through multivariate regression analysis. The results show that the backwater effect in the lower reaches of the Ganjiang River is closely related to the discharge at Waizhou Station. During low-flow periods, the backwater in the north branch elevates the water level at Nanchang Station, while when the discharge increases, the spiral flow in the main branch propagates downstream, generating a backwater effect between Changyi and Nanchang stations. When the discharge exceeds the critical threshold of $513\text{ m}^3/\text{s}$, the water level of Poyang Lake is higher than that of the lower reaches of the Ganjiang River, initiating a backwater effect from the lake onto the river. When the discharge further increases to $3211\text{ m}^3/\text{s}$, the backwater effect dissipates, and the flow diversion between the East River and West River tends to stabilize. The rainfall-induced runoff influences the evolutionary process of the generation and recession of the backwater effect, with a retardation effect ranging from 12% to 19% . After incorporating a correction term of rainfall-induced runoff, the precision of the water level difference prediction model is improved.

Key words: runoff backwater; water level difference; coupled hydrological-hydrodynamic model; multiple regression analysis; lower reaches of the Ganjiang River

江湖交汇区域因分汊结构复杂,湖区水位变动频繁,常出现径流顶托现象,对防洪减灾、航道治理及生态平衡造成显著影响^[1-3]。不同区域顶托作用

的主导驱动因素存在明显差异^[4],河水顶托多由河网交汇区地形或季节性径流差异引发,导致河道断面形态演变及泥沙输移沉积的时空变化^[5-8]。国内

外学者提出了多种分汉河道顶托效应的表征和分析方法。早期研究中,Yen 等^[9]基于水位-流量关系的多值性特征,提出河道水力特性图方法,通过恒定流公式量化上下游水动力特性关联性,但该方法对水文数据完整性依赖较高。为克服数据限制,后续研究转向构建多样化的顶托表征指标。例如:邴建平^[10]通过解析江湖水量交换机制,构建了顶托强度指数与倒灌强度指数的双参数评价体系;胡振鹏^[11]通过筛选顶托效应微弱时段的水文数据建立统计回归模型,以顶托比表征顶托强度。针对河湖水量交互关系,赵军凯等^[12]基于流域水量平衡理论构建了河道-湖泊水量交换系数的动态解析模型,实现调蓄功能与径流输入耦合关系的定量表征;王金洋^[13]对史灌河的研究表明,顶托强度与干流水位、支流距交汇口距离呈负相关关系,且河床高程骤变会加剧枯水期流态紊乱。由于多数江湖交汇区面积范围有限,现有研究多忽略降雨产流带来的影响^[14]。

赣江尾间河段具有典型的江湖交汇特征,河道呈多级分汉形态,径流分配受鄱阳湖顶托与长江回水的双重制约,导致分流比动态波动,上下游水位差显著^[15-17]。降雨与上游来流量的组合变化进一步加剧了顶托作用的时空异质性^[18]。Wen 等^[19]探讨了不同气候条件对赣江尾间河段整体流态和植被之间相互作用的影响;刘星根等^[20]基于遥感与 DEM 数据分析了碟形湖水体季节性分布特征,为顶托生态效应研究提供了新视角;陈斌等^[21]通过物理模型试验发现,外洲站流量增加会引发东河分流比下降、西河分流比上升,存在径流顶托现象;陈珣等^[22]进一步结合长序列冲淤数据,证实尾间段东河分流比持续萎缩、西河分流比稳步攀升的长期趋势,强调河道形态自调整对顶托效应的动态反馈作用;汝少鹏^[23]基于二维模型定量分析了赣江尾间主支径流顶托规律,发现外洲站流量低于 $900\text{ m}^3/\text{s}$ 时,鄱阳湖顶托效应显著;李晓文^[24]通过一维河网模型模拟赣江尾间地形变化对分流比的影响,指出主支与南支分流增加与河床下切直接相关。对于赣江尾间河段,现有研究多聚焦单一驱动因子(如流量或水位),对气候变化与极端事件的响应机制缺乏系统分析;上述研究均忽略了尾间区域的降雨产流,仅从水动力角度进行探讨。考虑到赣江尾间作为我国最大湖泊水系的一部分,集水面积大,降雨等外部环境因素可能进一步加剧顶托效应^[25],应考虑水文水动力耦合作用对顶托规律的影响。

本文采用水文水动力耦合模型模拟赣江尾间丰、平、枯水期及不同降雨强度多工况下的径流顶托现象,揭示多级分汉河道径流顶托规律及顶托强度

时空分布特征。根据模拟结果,以外洲站流量与南昌站水位为预测因子,基于多元回归分析,构建顶托发生时上下游水位差预测模型,并引入降雨产流量修正项提升预测精度,以期为赣江尾间防洪体系优化提供决策支持。

1 研究区概况

赣江作为长江一级支流及鄱阳湖流域最大水系,其流域面积约占江西省陆地总面积的 50%,发源于赣南山区,自赣州市向东北方向经南昌市后分汉形成四条入湖河道^[26]。该河流尾间段位于南昌市东北部,南北向贯穿南昌城区,自八一大桥下游扬子洲头处开始分汉形成东、西两股河道,继而二次分汉形成中支、北支、南支及主支四大入湖水道,见图 1。

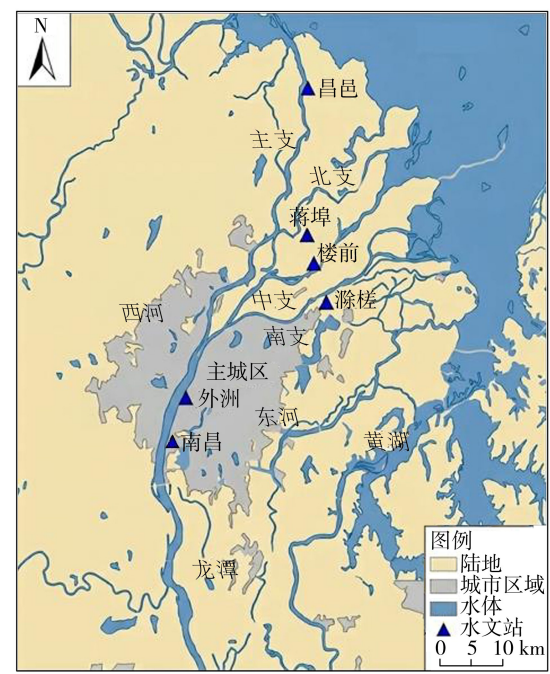


图 1 赣江尾间河段水系分布
Fig. 1 River system distribution in lower reaches of the Ganjiang River

尾间河段布设外洲、南昌、楼前、滁槎、蒋埠、昌邑等系列水文站,沿主支、南支、中支、北支等河道实施梯级观测。各站点主要承担流量及降水监测任务,部分站点同步开展泥沙输移与水质参数观测。区域降水呈现显著季节分异特征,汛期径流量约占年总量的 60%,在持续性暴雨或复合型洪水事件中易形成大范围、高强度的洪泛过程,其显著特征表现为洪峰流量大、退水历时长、淹没范围广,导致洪涝灾害影响具有空间扩展性^[27]。

南昌段河道在扬子洲分汉后形成主支、中支、南支、北支四股水流,其水动力特征呈现典型季节性差

异,枯水期径流集中于主槽输移,洪水期漫滩。鄱阳湖水位涨落与尾间河道洪水过程存在显著互馈效应,汛期湖面扩展促使原本分离的水体形成水力连通,枯水期则因湖水水位下降导致支流与湖体间产生顶托作用,这种复杂的水文相互作用显著增加了洪水演进过程的复杂性。

2 模型构建及验证

2.1 水文模型

赣江尾间河段设计产流面积高达 1482.87 km²,在降雨作用下会产生大量区间产流,对径流的影响不可忽略^[28-29]。通过耦合水文模型与水动力模型,可以准确地模拟复杂下垫面条件下的洪水演进过程,提高洪水预报精度^[30-31],为防洪排涝规划提供技术参考。

水文模型采用李彬权等^[32]提出的面向平原圩区复合下垫面的计算方法,核心思路在于刻画不同下垫面类型的产流过程并与圩内汇流及河道水动力过程耦合。模型涵盖林草地、旱地、水田、城市区域和水域 5 种主要土地利用类型,分别为其建立产流模块。林草地和旱地产流采用蓄满产流模型计算,旱地模块在此基础上耦合考虑灌溉过程。水田产流模块依据水稻不同生育期的需水特性与田间水量平衡进行计算,通过田间水深阈值控制产流发生;城市区域产流模块区分为具有填洼和不具有填洼的不透水面,降雨优先填补洼地,超出部分产生径流,无填洼表面直接产流;水域产流则设定产流阈值,当累积净雨量超过该阈值时发生产流。圩内汇流模块采用滞后演算法模拟陆面单元产流向排涝河道的汇集过程。根据 2022 年赣江尾间地区遥感影像、水系现状图、排水区分布以及河网水动力模拟的计算需要,将赣江下游龙头山水利枢纽至四支闸址的集水区域分为 18 个陆面计算单元,(图 2)也称为降雨分区,并假定每个计算单元内降雨时空分布均匀。

2.2 水文模型率定与验证

收集了研究区 2010—2019 年 60 个雨量站的逐日降雨和时段降雨资料、麻州蒸发站逐日蒸发资料以及峡山水文站逐日径流和时段径流数据,用于模型率定与验证。将时段降雨和时段径流数据线性插值为逐小时数据,并将逐日蒸发量数据等分为逐小时蒸发量数据。选取 2010—2015 年 11 场洪水用于模型率定,2016—2019 年 5 场洪水用于模型验证。水文模型的产流计算主要采用新安江模型,上游峡山站以上流域的产流参数用于率定与验证,相关参数取值如下:流域蒸散发折算系数为 1,张力水蓄水

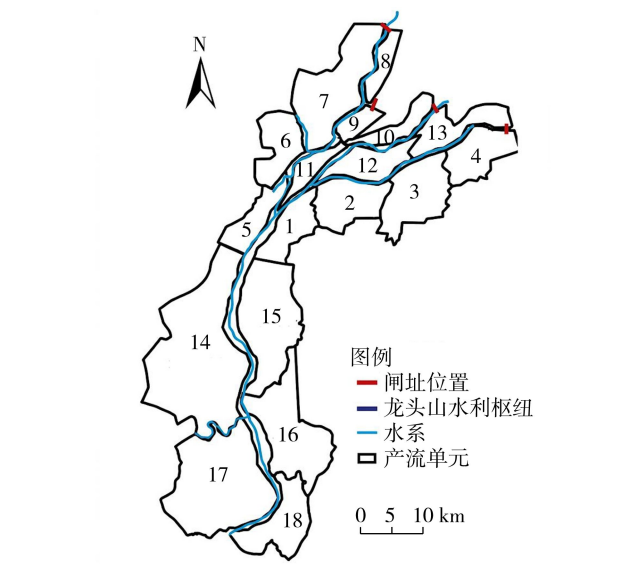


图 2 水文产流计算单元

Fig. 2 Hydrological runoff generation calculation units
容量曲线指数为 0.101,深层蒸散发系数为 0.149,上层、下层、深层张力水容量分别为 19.895、89.930、38.228 mm,不透水面积比例为 0.013,表层自由水蓄水容量为 59 mm,表层自由水蓄水容量曲线指数为 1.081,地下水、壤中流日出流系数分别为 0.186 和 0.514,地下水、壤中流消退系数分别为 0.970 和 0.720,河网蓄水消退系数为 0.892,河网汇流滞时为 7.783 h。

根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》要求,洪峰流量、洪量均以实测值的 20% 作为许可误差,峰现时间以预报发布时间至实测洪峰出现时间时距的 30% 作为许可误差,且决定系数 $R^2 \geq 0.6$ 。率定期和验证期模拟精度统计结果见表 1,率定期平均合格率为 82%,验证期平均合格率为 90%。

率定期新安江模型对 11 场场次洪水模拟结果 R^2 均值为 0.70,几项指标均符合要求的场次洪水有 8 场,合格率达 73%,各项指标的平均合格率达 82%。验证期新安江模型对 5 场场次洪水模拟结果 R^2 均值为 0.88,几项指标均符合要求的场次洪水有 3 场,合格率达 60%,各项指标的平均合格率达 90%。

2.3 二维水动力模型

本文开发了平面二维浅水模型对尾间河段进行洪水演进模拟。将描述三维水流运动的纳维-斯托克斯方程沿水深方向积分,得到二维浅水模型守恒方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (1)$$

其中 $U = (h, hu, hv)^T$

表 1 新安江模型场次洪水模拟结果

Table 1 Simulation results of Xinanjiang model for storm flood events

时期	洪号	R^2	洪峰误差/%	洪量误差/%	峰现时间误差/h	是否合格
率定期	20100609	0.84	-15.10	18.92	-5	合格
	20110429	0.90	-6.14	9.29	-3	合格
	20110709	0.91	-6.69	3.07	3	合格
	20120509	0.80	-10.34	5.36	-6	合格
	20120621	0.94	-3.29	13.37	-5	合格
	20120803	0.94	9.56	16.02	-3	合格
	20130514	0.87	-17.11	3.34	-4	合格
	20130713	0.23	39.40	31.15	-1	不合格
	20140521	0.01	-1.34	37.39	-3	不合格
	20150518	0.76	0.27	9.51	-15	合格
验证期	20151112	0.48	15.43	23.44	28	不合格
	20160316	0.94	0.15	7.64	-3	合格
	20170329	0.89	-1.37	2.07	3	合格
	20180105	0.85	-36.73	6.48	2	不合格
	20180605	0.84	-16.58	13.03	-1	合格
	20190606	0.88	-20.34	9.59	-3	不合格

$$\mathbf{F} = \left(hu, hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 - 2h\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, huv - h\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)^T$$
$$\mathbf{G} = \left(hv, huv - h\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 - 2h\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right)^T$$
$$\mathbf{S} = (S_1, S_2, S_3)^T$$
$$S_1 = 0$$

$$S_2 = -gh \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} + \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 h} \right) + f_h v + \frac{\sigma_x}{\rho} - \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$$
$$S_3 = -gh \left(\frac{\partial z_0}{\partial y} + \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 h} \right) - f_h u + \frac{\sigma_y}{\rho} - \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

式中： t 为时间； $\mathbf{U}$ 为守恒变量向量； $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ 分别为 x 、 y 方向的通量向量； h 为水深； u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速； S_i ($i=1,2,3$) 为源项，分别为底坡源项、摩阻和科氏力等； g 为重力加速度； z_0 为河底高程； C_z 为谢才系数； f 为柯氏系数； σ_x 、 σ_y 分别为 x 、 y 方向的风应力； ν_t 为水流紊动黏性系数； ρ 为水体密度； S_{xx} 、 S_{yy} 分别为 x 、 y 方向的波浪辐射正应力； S_{xy} 、 S_{yx} 为波浪辐射剪应力。

2.4 水文水动力耦合模型

水文模型与水动力模型耦合的具体过程为：将集水区划分为产流计算单元，在各计算单元内完成降雨产流计算后，通过陆面汇流过程聚集至单元出口，最终以旁侧入流方式注入水动力模型作为流量入口边界条件。时间维度上通过统一设置时间步长

与初始时刻实现同步演进；空间维度上需确定产流单元（图 2）与二维水动力模型入流节点位置。水文模型与水动力模型耦合采用地势趋低、邻近入流准则，具体步骤为：①基于 GIS 平台提取各水文单元几何中心坐标 (x_a, y_a) 和二维网格节点坐标 (x_i, y_i) ；②通过 DEM 数据与水文单元空间叠加，计算各单元平均高程 h_a ；③针对目标水文单元，遍历计算其几何中心至所有二维节点的平面距离 L ，选取最小距离 $L_{\min}$ 对应的节点作为该单元汇水入口，以松散单向耦合的方式实现水文模型与水动力模型的空间耦合，如图 3 所示（图中 Q_c 为单元流量， q 为单位长度流量）。

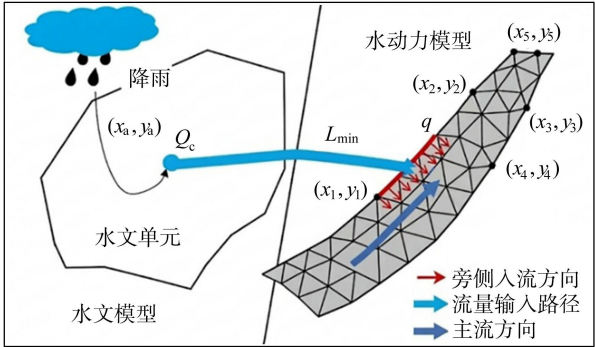


图 3 水文水动力耦合原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of hydrological-hydrodynamic coupling principles

2.5 水文水动力耦合模型率定与验证

赣江尾间地区河道水动力模型的构建范围为上游龙头山至下游入鄱阳湖各控制性水利设施处，包括主支、北支、中支、南支的枢纽^[33]。采用三角形网格剖分河道，最小网格边长 2 m，平均网格边长 50 m，节点数为 90 553，单元数为 174 370。设置 1 个流量入口边界和 4 个出流水位边界，采用最新、最优数据对不同来源、不同年份（2018 年、2019 年、2020 年）河道实测地形数据在 GIS 中进行拼接融合（图 4，以外洲站为原点）。在不同数据集的接边处，采用空间插值方法进行平滑过渡，以保证整个计算域内地形数据的连续性和合理性。计算域地形采用 2018 年、2019 年和 2020 年河道实测地形，其中西河以 2019 年地形为主，东河以 2018 年地形为主，主支和南支枢纽局部区域采用 2020 年实测地形。水动力计算过程中，模型出入口边界给定相应水位流量过程，其中上游为外洲站流量过程，下游四支为水位过程。利用水文模型对各产流单元的区间产流过程进行模拟，验证工况下各区域产流量与降雨过程响应一致。水文模型合理反映了下垫面产流特征，以旁侧入流的方式耦合水动力模型，水位边界分别由各水位站水位外延获得。

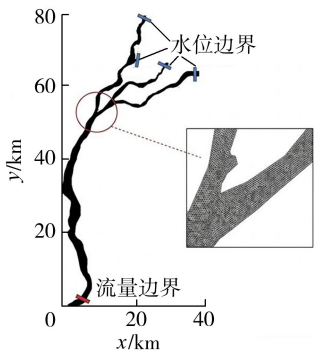


图4 计算区域及网格划分

Fig. 4 Simulation domain and grid generation

采用 2017—2020 年实测非洪水过程进行水动力模型率定,得到各河道糙率。主河道、西河、东河、主支、北支、中支、南支糙率分别为 0.035~0.037、0.028、0.027、0.018、0.033、0.028~0.030、0.026。

采用 2017 年 6 月 21 日至 7 月 13 日和 2019 年 6 月 22 日至 7 月 22 日两次洪水过程逐日水位流量资料对模型进行验证,并进行水动力模拟和水文水动力耦合模拟,结果见图 5。从图 5 可以看出,耦合水文模型后,水位模拟结果的均方根误差 (RMSE) 由 0.16 m 减小至 0.07 m,汇流的加入使得模拟水位抬高 0.16~0.54 m,说明水文水动力耦合模型可以更精确地模拟赣江尾间水动力过程。

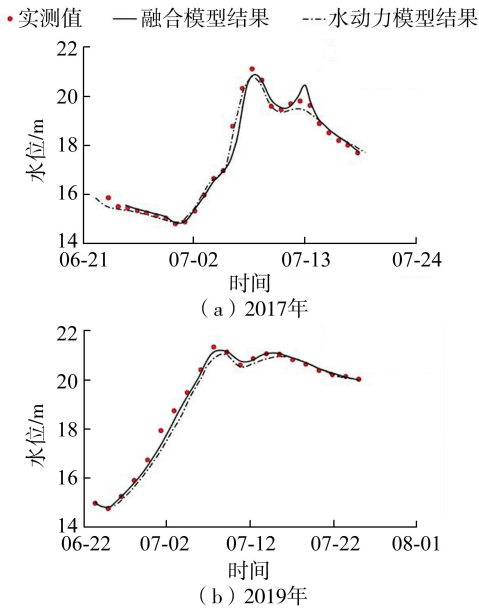


图5 南昌站水位过程线

Fig. 5 Water level hydrographs at Nanchang Station

3 结果与分析

3.1 工况设置

考虑 1997—2020 年枯、平、丰(外洲站洪峰流量分别为 772、2 237、13 547 m^3/s) 3 种实测洪水过程(图 6)和代表性的持续性暴雨和短历时强降雨(最

大降雨产流量分别为 333、600 m^3/s) 过程组合,共设计了 6 种工况,见表 2。采用外洲站流量边界条件进行数值模拟计算,将下游各水文站监测的水位过程设置为对应时期的水位边界条件,通过水文模型模拟生成区间产流。选取 2012—2020 年实测持续性暴雨和短历时强降雨两种代表性降雨情景,将其作为水文模型输入,分别生成对应的区间产流过程(图 7)。

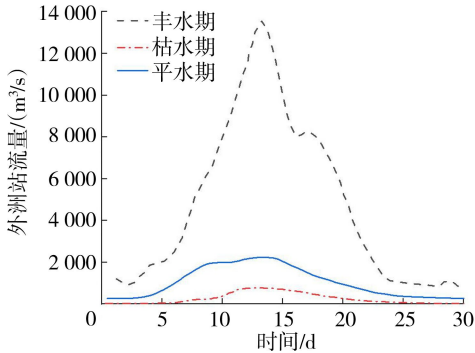


图6 不同时期洪水过程曲线

Fig. 6 Flood hydrographs for different periods

表2 工况设置 单位: m^3/s

Table 2 Case settings unit: m^3/s

工况	外洲站洪峰流量	最大降雨产流量
1	772	333
2	772	600
3	2 237	333
4	2 237	600
5	13 547	333
6	13 547	600

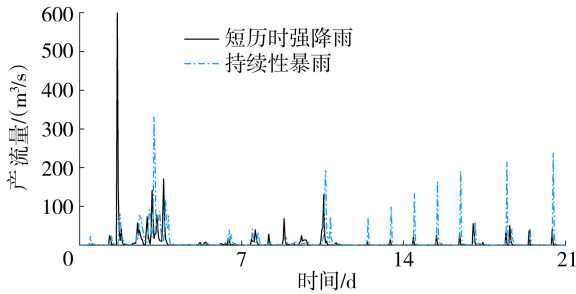


图7 不同降雨过程产流量

Fig. 7 Runoff discharge for different rainfall processes

3.2 径流顶托现象空间分布特征

当最大降雨产流量分别为 333 m^3/s 和 600 m^3/s 时,赣江尾间地区河段流场差异很小,表明降雨差异对整体流场结构影响较小,主导因素为外洲站流量变化。

如图 8 所示,在枯水期流量条件下(工况 1、2),河道呈现典型的中枯水期流态特征,北支河道出现明显回流区,此时主支河道保持稳定流向。顶托效应通过北支向上游传递,导致南昌站水位抬升。这种流态特征可能是由于北支河道较缓的坡降和局部

河床抬升,使得低流速条件下水流分离现象显著。

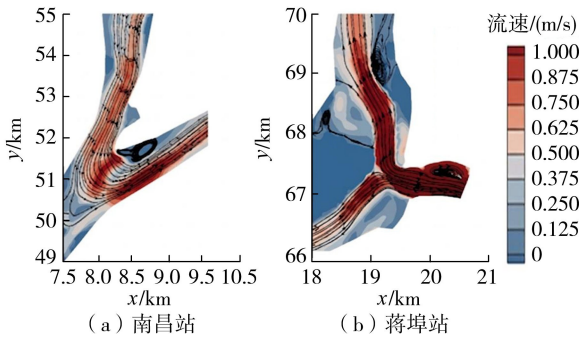


图 8 枯水期赣江尾间典型河段流场

Fig. 8 Flow field in representative river reaches of lower reaches of the Ganjiang River during low-flow period

如图 9 所示,在平水期流量条件下(工况 3、4),水动力条件发生显著变化,主支河道开始出现螺旋流现象,回流区长度扩展。此时北支分流比由低流量时的 35%下降至 22%。由于顶托作用,主支回流产生的反向水头压力导致南昌站水位累计抬升。

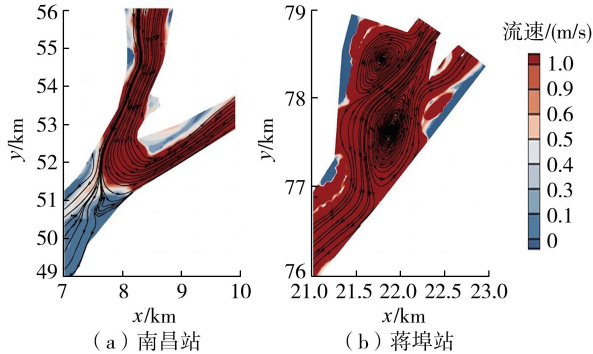


图 9 平水期赣江尾间典型河段流场

Fig. 9 Flow field in representative river reaches of lower reaches of the Ganjiang River during normal-flow period

如图 10 所示,在丰水期流量条件下(工况 5、6),赣江整体呈现强顶托鄱阳湖态势,此时东河、西河分流比相对稳定。可以看出,当外洲站来流量较小时,北支由于水位低于鄱阳湖水位,产生径流顶托,而主支不受影响;随着外洲站流量增大,北支不再产生回流,主支水位低于鄱阳湖水位,水流由主支顶托至南昌站;外洲站流量继续增加时,不再出现鄱阳湖回流现象,东河、西河分流稳定。

为了确定尾间顶托发生的临界阈值,定义水位差比(r_h)为上下游水位差与上游水位的比值,并以 r_h 表征顶托程度,统计并绘制所有工况不同时刻水位差比-流量散点图(图 11)。散点分布揭示了顶托发生与消退的流量阈值,其中蓝色散点表示鄱阳湖顶托外洲,此时出现径流顶托现象;红色散点表示外洲顶托鄱阳湖,此时无回流现象发生。当外洲站流量大于 $513 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,开始出现径流顶托现象,而当外洲站流量继续增加至 $3211 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,顶托现象基

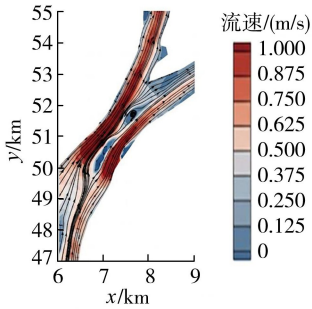


图 10 丰水期赣江尾间南昌站流场

Fig. 10 Flow field at Nanchang Station on lower reaches of the Ganjiang River during high-flow period

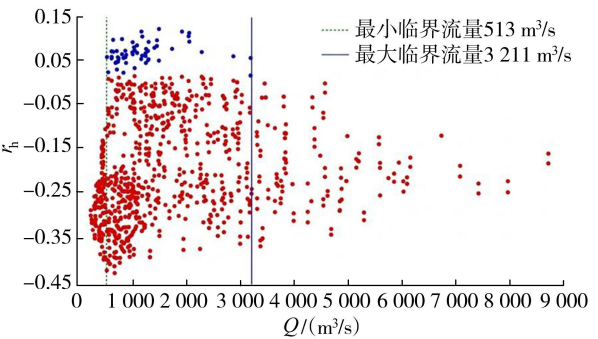


图 11 外洲站流量与顶托程度的关系

Fig. 11 Relationship between discharge at Waizhou Station and degree of backwater effect

本消失,东河、西河分流状态趋于稳定。蓝色散点在外洲站流量为 $800 \sim 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ 时顶托频率最高,该范围内的蓝色散点数占总蓝色散点数的 60.74%。

3.3 径流顶托现象时间演变特征

为深入剖析降雨对径流顶托作用的影响机制,采用水位-流量绳套图方法,对各水文站水位-流量关系进行定量表征。

如图 12 所示,枯水期流量条件下(工况 1、2),外洲站、南昌站、蒋埠站、昌邑站断面水位-流量呈现顺时针绳套关系,而楼前站和滁槎站断面则未观察到明显的绳套结构。外洲站与南昌站断面绳套形态相似,呈狭窄的顺时针环状,环宽相对较小。蒋埠站断面受顶托作用影响最为显著,绳套形态变化最剧烈,最大水位差达到 0.84 m 。与工况 1 相比,工况 2 绳套环宽增加了 12%~15%,且整体向右偏移,表明强降雨加剧了鄱阳湖顶托对退水过程的阻滞作用。

如图 13 所示,平水期流量条件下(工况 3、4),主支顶托导致绳套环宽显著增大,外洲站、南昌站、蒋埠站、昌邑站断面水位-流量呈现顺时针绳套关系,而楼前站和滁槎站断面无绳套关系。外洲站、南昌站和蒋埠站断面绳套形状相似,为狭窄的顺时针环状。昌邑站断面受顶托作用影响最为突出,绳套形态最不稳定,最大水位差达 1.11 m 。对比枯水期,平水期的绳套环更宽,这是由于顶托的物理机制

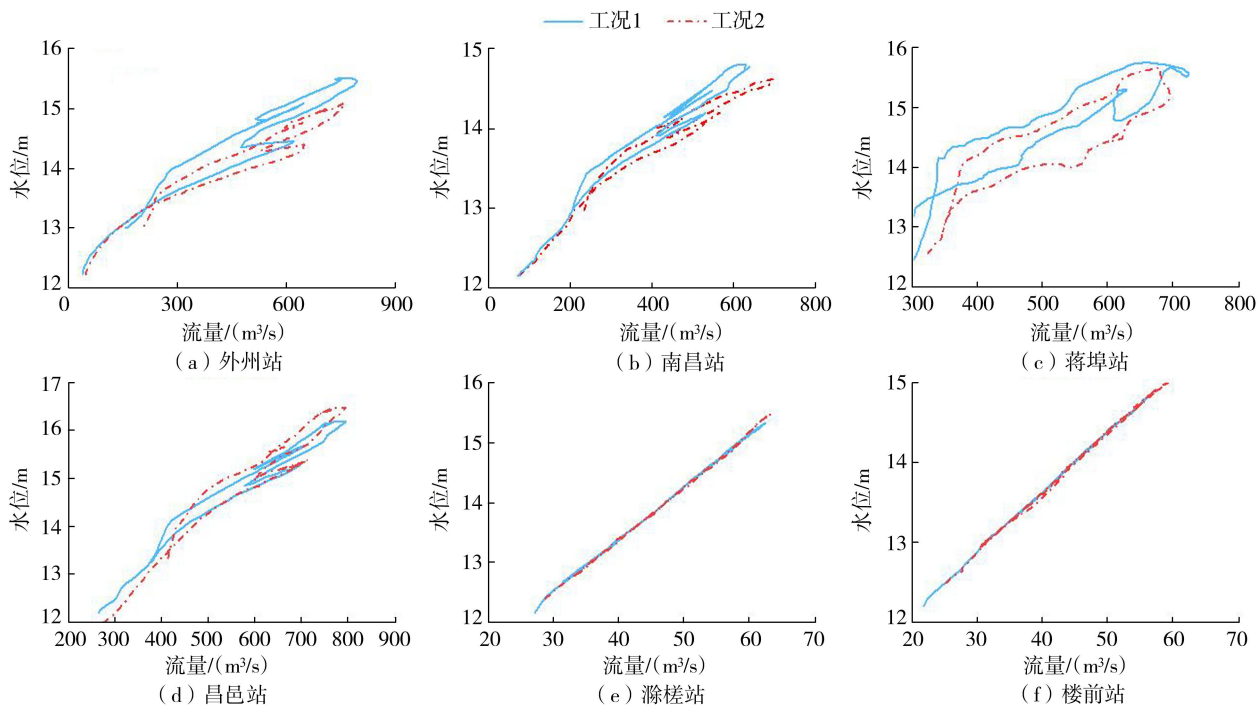


图 12 枯水期降水量对顶托作用的影响

Fig. 12 Impact of precipitation on backwater effect during low-flow period

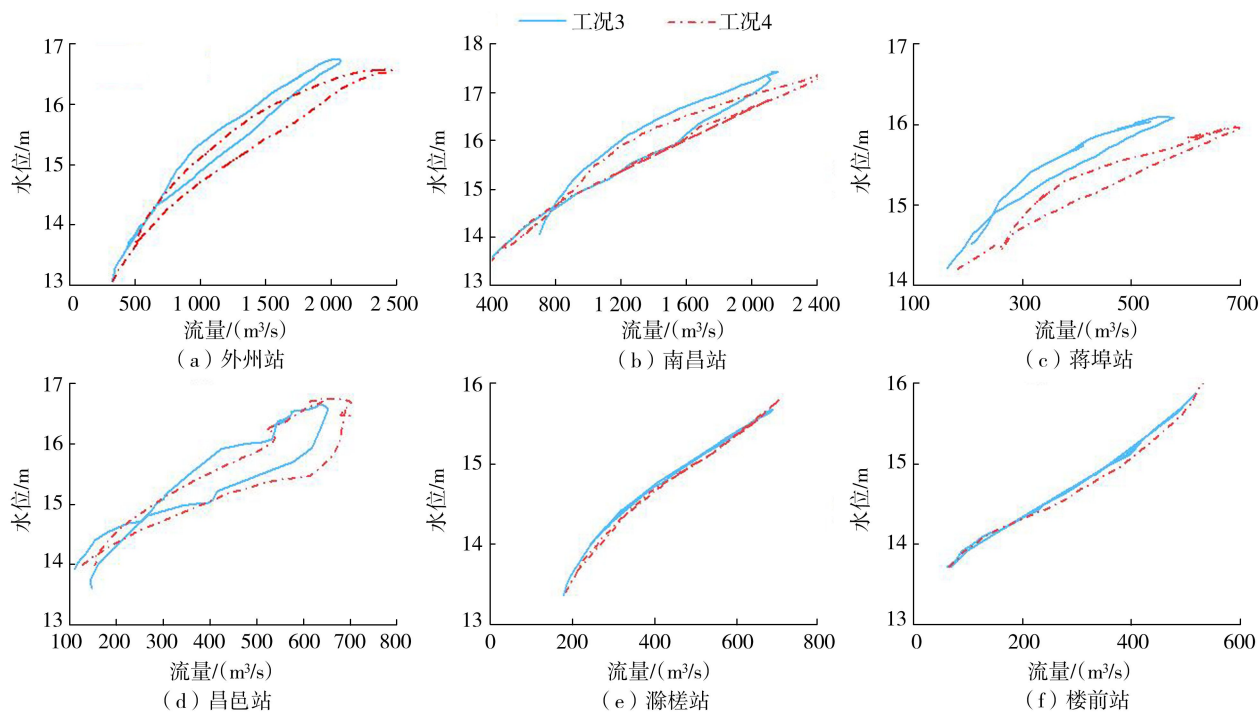


图 13 平水期降水量对顶托作用的影响

Fig. 13 Impact of precipitation on backwater effect during normal-flow period

发生了变化。枯水期顶托多为北支的局部回流,影响范围有限;而平水期则在主支形成了大范围的螺旋流,水动力非恒定效应更强,因此造成了更宽的绳套环。与工况 3 相比,工况 4 绳套环宽增大了 15%~19%,整体绳套向右倾斜,水文模型模拟的区间产流对顶托非恒定流效应具有显著加强作用,表明强降雨加剧了鄱阳湖顶托对退水过程的阻滞效应。

丰水期流量条件下(工况 5、6),各断面水位-流量均未出现明显的绳套现象,降雨变化对水位-流量关系的趋势无显著影响,随着降雨产流量增加,各站点流量和水位均呈现增大趋势。

3.4 顶托水位差预测模型及验证

为快速预测顶托对上下游水位差和降雨的影响,统计逐时上下游水位差 Δh 、南昌站水位 H 以及

外洲站流量 Q ,对 432 个样本进行多元相关性分析,结果见表 3。上下游水位差与外洲站流量之间在双尾 0.01 级别存在强正相关关系;而上下游水位差与南昌站水位在双尾 0.01 级别存在强负相关关系。 Δh 与 Q 和 H 均存在显著相关性,可以进一步进行非线性回归分析。

表 3 多元相关性分析结果

特征量	皮尔逊相关系数		
	Q	H	Δh
Q	1	0.029	0.743 **
H	0.029	1	-0.699 **
Δh	0.743 **	-0.699 **	1

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

在不考虑降雨影响下,以真实水位差为因变量,外洲站流量和南昌站水位为自变量,通过多元非线性回归分析,建立顶托水位差预测模型:

$$\Delta h = e^a Q^b H^c \tag{2}$$

式中: a 、 b 、 c 为待定系数。

利用 SPSS 软件进行多元非线性回归,结果如表 4 所示。

表 4 不考虑降雨影响多元非线性回归结果

Table 4 Multivariate nonlinear regression results without consideration of rainfall intensity

参数	拟合值	标准差	下限	上限
a	33.802	0.998	31.846	35.758
b	0.833	0.147	0.545	1.121
c	-15.696	0.397	-16.474	-14.918

注:下限和上限为各参数估计值的 95%置信区间边界。下同。

考虑降雨影响,利用最大降雨产流量对式(2)进行修正:

$$\Delta h = R^d e^a Q^b H^c \tag{3}$$

式中: R 为最大降雨产流量; d 为待定系数。

利用 SPSS 软件进行多元非线性回归,结果如表 5 所示。

表 5 考虑降雨影响的多元非线性回归结果

Table 5 Multivariate nonlinear regression results considering rainfall intensity

参数	拟合值	标准差	下限	上限
a	33.717	0.712	32.321	35.113
b	0.834	0.143	0.554	1.114
c	-15.722	0.446	-16.596	-14.848
d	0.023	0.008	0.007	0.039

为验证式(2)(3)的准确性,以 2019 年 10 月和 11 月外洲站实测流量过程为入流边界条件,对应下游各站点实测水位过程线为出流边界条件,对上下游水位差进行水文水动力耦合数值模拟。将式(2)(3)的计算结果与数值模拟结果进行对比,结果如图 14 所示。可以发现,10 月式(2)(3)的最大相对

误差分别为 7.6%和 6.4%,11 月的最大相对误差分别为 10.4%和 5.2%。说明引入降雨产流量修正项后模型有更高的预测精度。预测模型误差可能源于回归方程(幂函数)形式的简化,未能完全捕捉物理过程中所有复杂的非线性关系;模型未考虑如风场、水温等其他可能影响水位的次要因素以及特定水力条件下可能存在其他随机扰动。

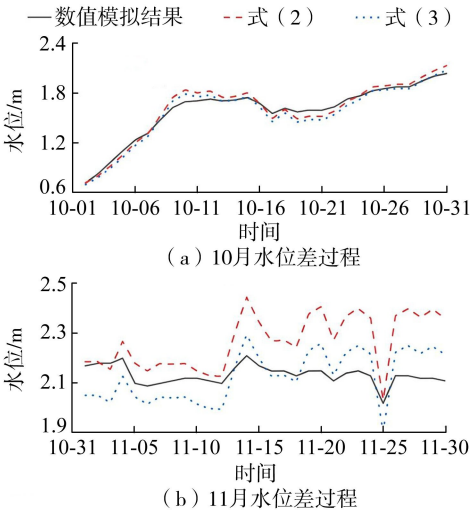


图 14 顶托水位差预测模型对比验证

Fig. 14 Comparative validation of backwater level difference prediction models

4 结 论

- a. 构建了适用于赣江尾闾区域的水文水动力耦合模型,暴雨期对径流水位模拟结果的 RMSE 由 0.16 m 减小至 0.07 m,汇流的加入使得水动力模型模拟水位抬高 0.16~0.54 m,模型具有较高的准确性。
- b. 赣江尾闾顶托效应与外洲站流量密切相关。外洲站流量较低时($Q < 513 \text{ m}^3/\text{s}$),北支河道因坡降平缓和局部河床抬升形成回流区,导致南昌站水位显著抬升;随着外洲站流量增加,主支河道出现螺旋流并向下游扩展,北支分流比下降;当外洲站流量足够大时($Q > 3211 \text{ m}^3/\text{s}$),赣江水位高于鄱阳湖水位,鄱阳湖对赣江的顶托效应消失,东河、西河分流趋于稳定。

c. 降雨产流量对顶托效应具有重要影响。当最大降雨产流量由 $333 \text{ m}^3/\text{s}$ 增至 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,绳套环宽增加 12%~19%,强降雨加剧了鄱阳湖顶托对退水过程的阻滞效应。通过多元回归分析,构建了顶托水位差预测模型,引入降雨产流量修正项后,模型预测精度有所提升。

参考文献:

[1] 尚海鑫,胡春宏,夏军强,等. 洞庭湖入汇对荆江河段水

- 位的顶托程度与范围[J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 431-441. (Shang Haixin, Hu Chunhong, Xia Junqiang, et al. Influence of Dongting Lake inflow on the degree and range of backwater effect in the Jingjiang reach [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(3): 431-441. (in Chinese))
- [2] 张睿康, 徐长江, 陈玺, 等. 长江流域典型枯水年径流时空演变特征[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 151-158. (Zhang Ruikang, Xu Changjiang, Chen Xi, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of runoff in typical dry years in the Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 151-158. (in Chinese))
- [3] Lesack L F W, Marsh P. Lengthening plus shortening of river-to-lake connection times in the Mackenzie River Delta respectively via two global change mechanisms along the arctic coast[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(23): L23404.
- [4] 徐凌云, 逢勇, 付浩. 保障望虞河引调水期水质的引水顶托条件研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 121-126. (Xu Linyun, Pang Yong, Fu Hao. Study of diversion backwater conditions for ensuring water quality of Wangyu River during water diversion period[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 121-126. (in Chinese))
- [5] Van Yperen A E, Holbrook J M, Poyatos-Moré M, et al. Backwater length estimates in modern and ancient fluvio-deltaic settings: review and proposal of standardized workflows[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 250: 104692.
- [6] Nagumo N, Kubo S, Sugai T, et al. Sediment accumulation owing to backwater effect in the lower reach of the Stung Sen River, Cambodia[J]. Geomorphology, 2017, 296: 182-192.
- [7] Aghazadegan A, Shokri A. Three-dimensional numerical simulation of mixing patterns at open channel confluences [J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(2): 236-246.
- [8] 曾诚, 周婧, 李凯, 等. 明渠交汇口水动力及掺混特性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 10-17. (Zeng Cheng, Zhou Jing, Li Kai, et al. Research progress on hydrodynamics and mixing characteristics of open-channel confluences [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 10-17. (in Chinese))
- [9] Yen B C, González-Castro J A. Open-channel capacity determination using hydraulic performance graph [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(2): 112-122.
- [10] 邴建平, 邓鹏鑫, 吕孙云, 等. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(8): 856-870. (Bing Jianping, Deng Pengxin, Lyu Sunyun, et al. The analysis of water exchange regime research on Poyang Lake and Yangtze River and driving factors[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(8): 856-870. (in Chinese))
- [11] 胡振鹏, 傅静. 长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 570-579. (Hu Zhenpeng, Fu Jing. Quantitative study on hydrology relationship between the Yangtze River and Poyang Lake and its changes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 570-579. (in Chinese))
- [12] 赵军凯, 李九发, 蒋陈娟, 等. 长江中下游河湖水量交换过程[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 759-770. (Zhao Junkai, Li Jiufa, Jiang Chenjuan, et al. Water exchange between river and lake in the middle and lower reach of Changjiang River[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 759-770. (in Chinese))
- [13] 王金洋, 假冬冬, 杨俊, 等. 受顶托作用的河道水流运动特征研究进展[J]. 水运工程, 2025(2): 101-109. (Wang Jinyang, Jia Dongdong, Yang Jun, et al. Study progress of movement characteristics of river flow affected by backwater [J]. Port & Waterway Engineering, 2025(2): 101-109. (in Chinese))
- [14] 王雨洁, 李致家, 姚成, 等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 11-18. (Wang Yujie, Li Zhijia, Yao Cheng, et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 11-18. (in Chinese))
- [15] 裴子玥, 肖洋, 张涛涛, 等. 赣江尾闾南支枢纽通航水流条件数值模拟研究[J]. 水运工程, 2024(5): 143-150. (Pei Ziyue, Xiao Yang, Zhang Taotao, et al. Numerical simulation of navigable water conditions at Nanzhi Hydro-Junction in Ganjiang River [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(5): 143-150. (in Chinese))
- [16] 周苏芬, 黄志文, 唐立模, 等. 赣江尾闾多级分汊河道分流影响因素及联动响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 163-169. (Zhou Sufen, Huang Zhiwen, Tang Limo, et al. Analysis on influencing factors of flow diversion ratio and linkage response of multistage bifurcations in the Ganjiang River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(2): 163-169. (in Chinese))
- [17] 邱勇, 张涛涛, 刘子涵, 等. 赣江尾闾主支枢纽二期围堰预进占施工对通航水流条件的影响[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(6): 126-133. (Qiu Yong, Zhang Taotao, Liu Zihan, et al. Impact of pre-advance construction for second-stage cofferdam of main branch project in lower reaches of the Ganjiang River on navigation flow conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(6): 126-133. (in Chinese))
- [18] 陈界仁, 刘涵心, 吕婷婷. 赣江尾闾河道枯水位变化与成因分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(10): 28-31.

- (Chen Jieren, Liu Hanxin, Lyu Tingting. Analysis of low water level variation and cause for Ganjiang Trail channel [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 28-31. (in Chinese))
- [19] Wen Zhiliang, Zhou Zhen, Wei Xiting, et al. Spatio-temporal simulation of the productivity of four typical subtropical forests: a case study of the Ganjiang River Basin in China[J]. Forests, 2025, 16(4): 603.
- [20] 刘星根, 谭志强, 范宏翔. 赣江尾间碟形湖水体季节性分布特征[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 66-72. (Liu Xinggen, Tan Zhiqiang, Fan Hongxiang. Seasonal distribution of sub-lakes on tail-streams of Ganjiang River [J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 66-72. (in Chinese))
- [21] 陈斌, 邹年华, 许新发, 等. 鄱阳湖水位变化对赣江尾间河段分流比影响研究[J]. 人民长江, 2018, 49(8): 8-12. (Chen Bin, Wu Nianhua, Xu Xinfu, et al. Test study on effects of water level fluctuation of Poyang Lake on diversion ratio of estuaries of Ganjiang River [J]. Yangtze River, 2018, 49(8): 8-12. (in Chinese))
- [22] 陈珺, 嵇敏, 林江, 等. 赣江尾间河段水沙特性及河床演变[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 1-5. (Chen Jun, Ji Min, Lin Jiang, et al. Runoff-sediment characteristics and riverbed evolution of Ganjiang River sink [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 1-5. (in Chinese))
- [23] 汝少鹏. 鄱阳湖赣江尾间地区径流顶托影响规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- [24] 李晓文. 赣江尾间河网区非恒定流数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [25] 白玉川, 李晓文, 徐海珏, 等. 赣江尾间河网地形变化对洪季水动力的影响[J]. 水力发电学报, 2022, 41(3): 9-21. (Bai Yuchuan, Li Xiaowen, Xu Haijue, et al. Effects of topographic changes in terminal river network of Ganjiang River on its hydrodynamics in flood season [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(3): 9-21. (in Chinese))
- [26] 黄彬彬, 严登华, 李卿鹏. 赣江尾间河段水环境演变规律与驱动因子分析[J]. 人民长江, 2019, 50(增刊2): 26-29. (Huang Binbin, Yan Denghua, Li Qingpeng. Trend and driving factors of water quality variation in lower reaches of Ganjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2019, 50(S2): 26-29. (in Chinese))
- [27] 罗春, 杨进生, 吴彬. 赣江下游河段设计最低通航水位计算方法[J]. 水利水运工程学报, 2002(4): 54-56. (Luo Chun, Yang Jinsheng, Wu Bin. Computation of designed lowest navigable stage in lower reaches of Ganjiang River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(4): 54-56. (in Chinese))
- [28] 徐飞, 温天福, 刘佳嘉, 等. 1957—2018 年赣江源区水源涵养时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(1): 47-53. (Xu Fei, Wen Tianfu, Liu Jiajia, et al. Spatiotemporal variations of water conservation in the Ganjiang River headwater area from 1957 to 2018 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2025, 36(1): 47-53. (in Chinese))
- [29] 陈晓菲, 任立良, 江善虎, 等. 赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 33-37. (Chen Xiaofei, Ren Liliang, Jiang Shanhu, et al. RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang Basin [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 33-37. (in Chinese))
- [30] 张珂, 罗煜宁, 王宇昊, 等. 考虑变动产流模式的金沙江流域降雨融雪径流模拟及水文响应分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 213-222. (Zhang Ke, Luo Yuning, Wang Yuhao, et al. Rainfall-snowmelt runoff simulation and hydrological response analysis in the Jinsha River Basin considering dynamic runoff-generation mode [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 213-222. (in Chinese))
- [31] 肖雪玲, 向小华, 吴晓玲. 嘉兴市城市防洪包围圈下垫面变化对洪水风险的影响[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 26-31. (Xiao Xueling, Xiang Xiaohua, Wu Xiaoling. Impact of underlying surface changes of urban flood control encirclement of Jiaxing City on flood risk [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 26-31. (in Chinese))
- [32] 李彬权, 陈丞, 肖洋, 等. 平原圩区复合下垫面水文水动力耦合模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 805-816. (Li Binqun, Chen Cheng, Xiao Yang, et al. A hydrological and hydrodynamic coupling model in polder areas with a complex underlying surface [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 805-816. (in Chinese))
- [33] 唐立模, 叶志恒, 杨家启, 等. 赣江南昌河段水位降低现状及影响因素[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 13-18. (Tang Limo, Ye Zhiheng, Yang Jiaqi, et al. Status analysis and influence factors of water level dropping in Nanchang reach of Ganjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6): 13-18. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-05-24 编辑: 施业)

