

张新铭, 唐立模, 万扬, 等. 赣江尾间多级分汊河道水动力空间优化研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 131-148. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.010

ZHANG Xinming, TANG Limo, WAN Yang, et al. Study on hydrodynamic spatial optimization of multi-level branched channels in Ganjiang River estuary[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 131-148. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.010

赣江尾间多级分汊河道水动力空间优化研究

张新铭¹, 唐立模¹, 万扬¹, 游文荪², 王志超²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029)

摘要:【目的】针对赣江尾间河段因水动力分配不均导致的航运受阻、生态退化等衍生问题, 拟通过定量分析南昌水利枢纽蓄水运行后的分流比优化方案, 改善尾间河段水动力分配不均问题。【方法】基于水动力数值模拟方法, 构建了赣江尾间河段二维水动力模型。模拟 1983—2018 年四种历史分流比工况下枢纽蓄水至外洲站水位 15.5 m 时的水动力响应特征, 分析各分支河道流速变化规律; 结合尾间河段航运、生态流量要求、流速需求与各支过流能力, 明确水量分配多目标约束条件; 采用最大化最小流速法(Max-Min 准则)进行分流比优化。【结果】研究表明: 在枢纽蓄水后, 在外洲流量小于等于 2 000 m³/s, 外洲与下游各支闸前的水位落差在 0.5 m 以内, 且流量越低落差越小; 优化后的分流比方案在外洲流量 500 m³/s 时, 较四种历史分流比方案将各支流流速下限提高了 18.9% 以上; 1 000 m³/s 时将流速下限提升了 12.3% 以上; 2 000 m³/s 时将各支流流速下限提升了 15.4% 以上, 控制在 0.16~0.19 m/s 避免了其他分流比方案产生的流速极端差异; 4 000 m³/s 时降低了流速的上限, 使得各支流流速在 0.46 m/s 以下, 较其他分流比缓解了高流速对河床的冲刷。【结论】通过南昌枢纽的流量调控, 可以有效改善各支水动力的不均匀特性, 在各支流水动力满足基本的生态、航运需求的基础上提升了流速下限, 控制了流速上限, 解决了支流季节性断流问题, 为多目标协同的水资源调度提供决策依据。

关键词: 赣江尾间; 数值模拟; 多级分汊河道; 多目标优化; 水动力; 鄱阳湖

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.010

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV143

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0131-18



Study on hydrodynamic spatial optimization of multi-level branched channels in Ganjiang River estuary

ZHANG Xinming¹, TANG Limo¹, WAN Yang¹, YOU Wensun², WANG Zhichao²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, Jiangxi, China)

Abstract: [Objective] The issues of navigation obstruction and ecological degradation are caused by uneven hydrodynamic

收稿日期: 2025-04-25; 修回日期: 2025-07-12; 录用日期: 2025-07-14; 网络出版日期: 2025-07-17

基金项目: 国家重点研发计划项目“长江中下游平原河网区水动力优化再构与自然动能高效利用”(2022YFC3202603); 江西省水利厅科技项目“入湖多级分汊河道多目标流量动态调控技术研发与应用”(202325ZDKT04)

作者简介: 张新铭(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事河流管理与生态环境研究。E-mail: xinming_zhang0415@hhu.edu.cn

通信作者: 唐立模(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事泥沙运动力学、河流动力学与现代流体测试技术研究。E-mail: tanglimo@hhu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

distribution in the river section of the Ganjiang River estuary. To address these, the optimization of flow diversion ratios after the impoundment operation of the Nanchang Hydraulic Hub is quantitatively analyzed, thereby improving the uneven hydrodynamic distribution in the river section of the estuary. [Methods] Based on hydrodynamic numerical simulation, a two-dimensional hydrodynamic model of the river section of Ganjiang River estuary was established. The hydrodynamic response characteristics were simulated under four operating conditions of historical flow diversion ratios from 1983 to 2018 when the hub impoundment raised the water level at Waizhou station to 15.5 m. The flow velocity variation patterns in each channel were analyzed. Combining navigation requirements, ecological flow demands, flow velocity requirements, and the flow capacity of each branch in the river section of the estuary, multi-objective constraints for water allocation were defined. The Max-Min criterion (maximization of minimum velocity method) was applied to optimize the flow diversion ratios. [Results] The result showed that after the hub impoundment, when the flow at Waizhou station was less than or equal to $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, the water level difference between Waizhou and the downstream gates of each branch remained within 0.5 m, with smaller differences observed at lower flow rates. Under the optimized flow diversion ratio scheme, when the flow rate at Waizhou station was $500\ \text{m}^3/\text{s}$, the minimum flow velocity in each branch increased by over 18.9% compared to the four historical flow diversion schemes. At $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, the lower limit of flow velocity increased by more than 12.3%. At $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, the lower limit of flow velocity in each branch increased by more than 15.4%, maintaining velocities within the range of 0.16 to 0.19 m/s and avoiding extreme flow velocity differences caused by other flow diversion ratio schemes. When the flow reached $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, the upper limit of flow velocity reduced, keeping the velocities of all branches below 0.46 m/s, thereby alleviating the scouring of riverbeds caused by high flow velocity compared to other schemes. [Conclusion] Flow regulation via the Nanchang Hub effectively improves the uneven hydrodynamic characteristics among the branches. While meeting the basic ecological and navigation requirements of each branch, this regulation raises the lower limit of flow velocity, controls the upper limit, and addresses the issue of seasonal flow interruptions in the branches, thereby providing a decision-making basis for multi-objective coordinated water resource scheduling.

Keywords: Ganjiang River estuary; numerical simulation; multi-level branched channels; multi-objective optimization; hydrodynamics; Poyang Lake

0 引言

赣江尾间地区是江西省经济社会资源最密集的地区, 在全省经济社会发展中占有十分重要的地位。近年来赣江尾间河段水文情势发生重大变化, 受河床下切、河流开发利用等综合影响, 四条支汊的分流比发生了显著变化, 2000年前枯水期赣江主支分流比在60%左右, 现状分流比达80%以上, 而其他三汊(南支、中支、北支)过流明显减少, 北支、中支河段甚至出现断流现象^[1-2]。同时鄱阳湖连续出现枯水期提前、枯水期延长、枯水位超低等现象, 加剧了赣江尾间河道枯水期水位逐年走低趋势^[3]。枯水期的河道水位降低引发了尾间地区水域减少、洲滩裸露、水生生态功能下降、水环境承载能力减弱^[4], 给船只通行、城镇供水和农业灌溉取水带来困难。

针对赣江尾间前人从多角度开展了丰富的研究。在水沙关系的研究中, 肖洋等^[5]采用有序聚类分析和小波分析等统计方法分析赣江外洲站1957—2008年水沙数据, 发现年径流量无显著趋势变化, 但存在10~12 a丰枯周期, 而年输沙量呈明显下降趋势并在1984和1998年发生突变, 其周期性由1966—1986年

间的4 a, 在1986年后转变为3.7 a, 主要受水土保持、采砂活动和万安水库拦沙等人类活动影响。郭程程等^[6]通过Mann-Kendall检验、双累积曲线等方法分析赣江支流禾水河1980—2019年水沙数据, 发现人类活动(特别是水库建设和水土保持工程)对输沙量减少的贡献率达98%, 其中水利工程的拦沙作用显著而迅速, 水土保持措施则具有滞后性。在水动力驱动因素研究中, 唐立模等^[7]根据多次实测的赣江东西河分流比资料, 分析了东西河分流特性与流量、水位、两汊道过水条件、汊道比降等诸多因素的相关关系。黄志文等^[8-9]分析了赣江尾间入鄱阳湖水位对东西河及各分汊段分流比的影响。周苏芬等^[10]通过物理模型试验的方式分析了赣江尾间多级分汊河道水动力的联动响应规律, 研究发现分流比对水面比降改变的敏感性随着流量减小而加大。在生态、水质研究方面, 任长江等^[11]采用水质标识指数法评价赣江尾间段水质, 结果显示赣江三条支流(北、中、南支)水质为Ⅲ—Ⅳ类轻度污染, 赣江尾间河段水质污染源主要为动物和鸟类粪便, 主要污染物为化学需氧量(COD)和总氮(TN), 其中中支水质较优, 南支和北

支较差。同样地黄彬彬等^[12]通过主成分分析和灰色关联模型分析赣江尾间 1997—2015 年水质数据, 也发现 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是主要污染物。相关研究表明通过适当调度, 加快水体流动, 溶解氧指标最容易得到改善^[13]。

通过水利设施对河道水系水动力进行干预是一种常见的工程方法, 水闸与泵站等水利工程的运行能够改变局部水位分布与流量分配, 从而影响流域整体水动力过程。HUANG 等^[14]采用 Mann-Kendall 法和水动力模型等不同方法模拟和预测了受鄱阳湖水利枢纽影响的漫滩湖泊水体更新时间。TANG 等^[15]提出了平原河网水动力优化理论, 通过对水闸和泵站等水利工程的优化控制, 解决了扬州城区水动力不足的问题。白慧文等^[16]发现通过水闸对河道水动力的干预可以有效地抑制藻类生长避免水华暴发。徐存东等^[17]利用二维水动力-水质耦合模型, 证明通过闸泵联动可将太湖流域支流氨氮浓度峰值削减 34%, 为跨区域调水工程提供了量化依据。LI 等^[18]通过对水闸的合理运行, 调控潮汐输入路径与流量显著增强了潮汐湿地的水文连通性, 为生态恢复提供了关键水动力条件。GAO 等^[20]通过水利工程干预, 将河流网络的整体流速提升了 38.56%, 其中 57.7% 的河流达到了 0.035 m/s, 使得北雁荡湖的 COD 浓度降低了 19.57%, 总磷 (TP) 浓度降低了 20.69%。BAI 等^[21]提出了一种耦合水动力与水库调度的生态补水优化模型, 以永定河生态补水工程为例, 通过分析黄河调水方案发现: 当补水成本加倍时, 采用黄河水进行生态补水可使生态保障度提升 48.8%, 并推荐了两套生态供水方案 (保障度均超 90%), 为缺水河流生态补水提供了新思路。

当前关于赣江尾间水动力分配失衡的成因机制与演变特征研究已较为全面, 但针对人工调控改善水动力条件的干预性研究仍显不足。正在建设的南昌水利枢纽是为了解决赣江尾间水动力分配问题的重要工程, 通过在尾间四支建立水闸进行联合调度来满足赣江的航运、生态等水资源分配需求。因此, 本研究旨在通过水动力模型模拟与分析, 探讨南昌枢纽建成后分流比的干预策略, 为解决赣江尾间水动力分布不均问题提供科学方案。

1 研究区域

1.1 研究范围

赣江下游尾间段位于北纬 $28^{\circ}40'$ — $29^{\circ}10'$, 东经 $115^{\circ}50'$ — $116^{\circ}30'$ 之间, 流域面积约 1 600 km^2 , 在南

昌市扬子洲前分为东西两河, 西河在樵舍再次分汊为主支 (西支) 和北支, 东河在礁矶头分汊为中支和南支, 最终汇入鄱阳湖, 主支入湖处为吴城镇, 南支于三江口处与信江共同汇入鄱阳湖。赣江尾间地区整体地势平缓, 是现代缓坡三角洲^[20]。

赣江尾间南昌水利枢纽工程包括 4 座水闸, 各闸布置位置如图 1 所示。象山枢纽 (S1) 位于赣江下游尾间赣江主支, 新建区象山镇鸭洲村附近, 距象山镇 6 km, 距南昌市约 35 km; 联新枢纽 (S2) 位于赣江下游尾间赣江北支, 左右岸分别为廿四联圩、南新联圩, 位于丰乐大桥上游 600 m, 距南昌市约 23 km; 南新枢纽 (S3) 位于赣江下游尾间赣江中支, 南昌县南新乡南新村附近, 距南新乡 5 km, 距南昌市 28 km; 吉里枢纽 (S4) 位于赣江下游尾间赣江南支, 五洲尾附近, 左、右岸分别为蒋巷联圩、红旗联圩, 距南昌市约 35 km。

1.2 南昌水利枢纽介绍

南昌水利枢纽施工总工期为 65 个月, 从 2020 年 12 月—2026 年 4 月, 主支象山枢纽工程施工期为 2020 年 12 月—2026 年 4 月; 北支联新枢纽工程施工期为 2022 年 9 月—2024 年 7 月; 中支南新枢纽工程施工期为 2021 年 9 月—2023 年 7 月; 南支吉里枢纽工程施工期为 2021 年 1 月—2022 年 12 月; 洲头防护工程施工期为 2021 年 1 月—2022 年 12 月。

南昌水利枢纽工程采用分时段动态调控的运行模式, 根据水文条件和调控目标实施调度。工程考量流域生态系统完整性, 规避 4—6 月鱼类繁殖期, 在 4—7 月各枢纽闸门全开运行, 保持河道自然泄洪状态; 8 月—次年 3 月枯水期实行多级精准调控: 当外洲站水位低于 15.5 m 设计标准时, 通过多闸门协同调度实现水位控制, 并优化配置各分叉河道下泄流量; 当水位超过调控标准时, 则采取渐进式开闸泄洪策略, 逐步恢复河道自然水文过程。工程以 4 月 1 日和 8 月 1 日为关键节点, 泄水期执行水位日降幅不超过 0.5 m 的技术标准, 以确保河岸稳定安全。

2 研究方法

2.1 二维水动力模型的构建

本文基于 MIKE21 平台构建了赣江尾间水动力数学模型, 并对其进行了验证与试验。MIKE 软件由丹麦水资源与环境研究所 (DHI) 开发, 其中 MIKE21 是一款专业的工程模拟软件包, 广泛应用于河流、湖泊、河口、海湾以及海洋环境的水流、波浪、泥沙

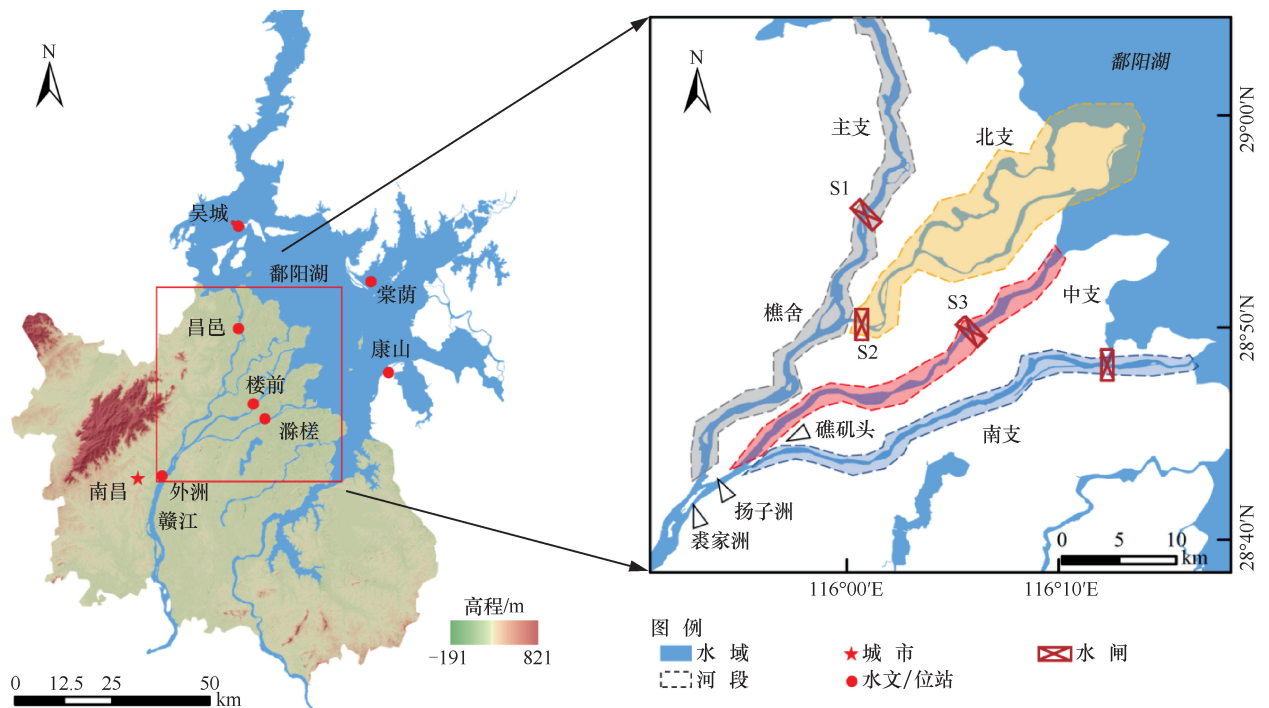


图1 赣江尾间区域河道分汊及南昌水利枢纽布置

Fig. 1 Branched channels in Ganjiang River estuary and layout of Nanchang Hydraulic Hub

输移和生态环境等模拟分析。

2.1.1 基本方程

MIKE21 水动力模型采用的浅水方程基于二维不可压缩雷诺平均纳维-斯托克斯方程进行求解, 并遵循静水压力假设, 主要公式如下。

连续方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

x 方向动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (2)$$

y 方向动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t 为时间(s); x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标系(m); η 为地表高程(m); h 为总水深(m); u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向流速(m/s); f 为科里奥利参数(s^{-1}); g 为重力加速度(m/s^2); ρ_0 为水的密度(kg/m^3);

s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为应力张量的分量(N/m^2); P_a 为大气压强(N/m^2); S 为点源流量大小(m^3/s); F 为水平涡黏项(m/s^2)。

2.1.2 模型范围和主要参数设置

模型边界上起赣江外洲水文站, 下游主支至吴城水位站, 北支下游分汊分别至官港和沙汊河, 中支至杨家村、南支至三江口。模型网格采用非结构网格, 网格边长 35~70 m 不等, 为保证模拟的效率和精度, 将三角形网格的内角控制在 30° 以上, 每个节点连接的网格数量不超过 8 个, 共计节点数 80 287、网格数 154 802(见图 2)。

模拟中最小时间步长设为 0.01 s, 最大时间步长设为 10 s, CFL 数设置为 0.8。模型干湿边界将干湿水深分别设置为干水深 $h_{dry} = 0.005$ m, 湿水深 $h_{wet} = 0.05$ m。曼宁系数 $n = 0.033 \sim 0.045$, 对主流和分汊分别设置了不同的糙率值, 以提高模拟精度。边界条件按流量边界与水位边界设置, 上游外洲边界入口处为流量条件, 下游边界条件为水位边界条件, 其中主支的边界条件由吴城水位站确定, 北支、中支与南支的边界位于各汊入湖口, 边界水位条件由湖区的康山和棠荫站水位通过插值的方法进行设置。

2.1.3 地形处理与工程影响

模型地形依据 2018 年赣江尾间实测地形资料, 采用自然邻近法进行插值处理。2018 年以来的河道

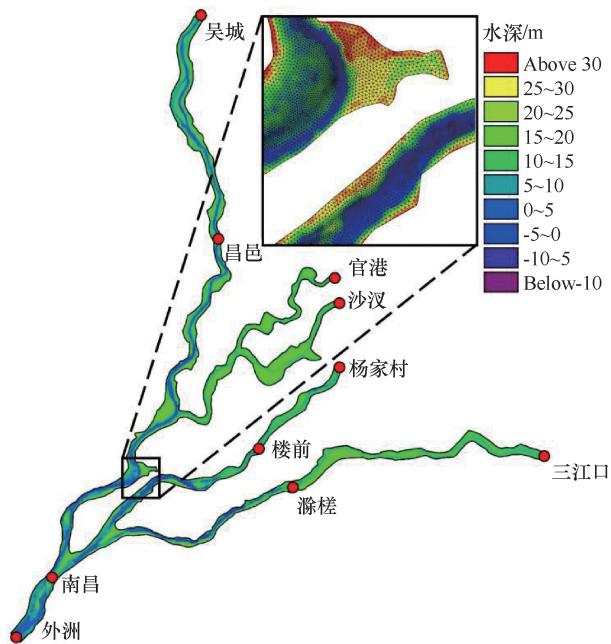


图2 模型模拟区域布置及网格

Fig.2 Model simulation area layout and grid

形态变化的影响因素, 主要包括河道的自然演化与人类活动, 2019年江西省赣州市人民政府颁布《关于赣江赣州段全线禁止河道采砂的通告》, 严禁任何形式的河道采砂活动, 赣江尾间河道急剧下切的态势得到有效控制。在工程影响方面, 已于2022年完工的洲头防护工程有相关试验研究表明, 其对赣江尾间分流比的影响程度小于1%^[22]。基于该研究成果, 本模型未计入该工程的水动力影响。因此, 2018年的实测地形数据仍能较好地反映当前赣江尾间河道的整体形态特征, 具有重要的参考价值和应用意义。考虑到在建工程将对赣江尾间水动力条件产生显著影响, 本研究在地形插值处理过程中, 已根据工程总体布置方案对各枢纽闸底高程进行了人工修正, 在河道深泓线、上下游边界以及水闸布置处网格进行了加密处理。

2.1.4 模型的验证

采用外洲、南昌、昌邑、楼前、滁槎五个水文/水位站的实测数据, 对模型进行了验证。模型模拟了2018年全年的水文过程, 模拟结果与实测值如图3所示。

本文采用了相关系数 r 和纳什系数 NSE 来评估模型运行的拟合程度和准确性, 相关公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{obs, i} - \bar{H}_{obs})(H_{sim, i} - \bar{H}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{obs, i} - \bar{H}_{obs})^2 \sum_{i=1}^N (H_{sim, i} - \bar{H}_{sim})^2}} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (H_{obs, i} - H_{sim, i})^2}{\sum_{i=1}^N (H_{obs, i} - \bar{H}_{obs})^2} \quad (5)$$

式中, N 为数据点的数量; $H_{obs, i}$ 为第 i 个观测数据的值; $H_{sim, i}$ 为第 i 个数据的模拟结果; \bar{H}_{obs} 为观测数据的平均值; \bar{H}_{sim} 为模拟数据的平均值。

此外通过统计分析的方法对模型误差进行了评估(见表1), 具体的评估指标有平均误差 (ME , Mean Error)、均方根误差 ($RMSE$, Root Mean Square Error) 和相对均方根误差 ($RRMSE$, Relative $RMSE$)。相关公式如下

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{sim, i} - H_{obs, i}) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{sim, i} - H_{obs, i})^2} \quad (7)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{H_{max} - H_{min}} \quad (8)$$

式中, H_{max} 为水位实际观测值的最大值; H_{min} 为水位实际观测值的最小值。

表1模型验证结果表明: 相关性系数 r 与纳什系数 NSE 均分别大于0.95和0.94, 较为精确地模拟了2018年全年的洪水过程, 说明模型模拟结果较为可靠; 平均误差 ME 的绝对值在0.016~0.202之间说明整体偏差较小; $RMSE$ 在0.204~0.335 m之间, 由于模型整体的水位变化幅度达到7 m, $RRMSE$ 均小于5%, 表明模型的相对误差较小。总的来说, 该模型较好地满足对于赣江尾间多级分汊河道水动力模拟精度需求。

2.1.5 试验工况

在枢纽建成运行后, 可以通过控制不同分支水闸的闸门开度根据具体需求调整分流比, 但蓄水后不同分流比所产生的水位、流速情况尚待研究。根据人类活动对赣江尾间河道演变的影响程度, 可将其历史分流比变化划分为四个典型发展时期: 1983年未受人类活动明显影响时期, 1998年万安水库建成后受水利工程因素影响时期, 2013年受非法采砂影响河道形态显著改变时期, 2018年非法采砂管控后河道自然演化时期。表2为外洲站水位同为15.5 m时, 不同年份自然条件下的分流比。其中1983年的分流数据取自参考文献[21], 结合1983年的外洲水位插值得到。1998年与2013年的数据来源于白玉川等^[23]开展的研究, 2018年的分流比数据由2.1.3节模型验证数据提供。

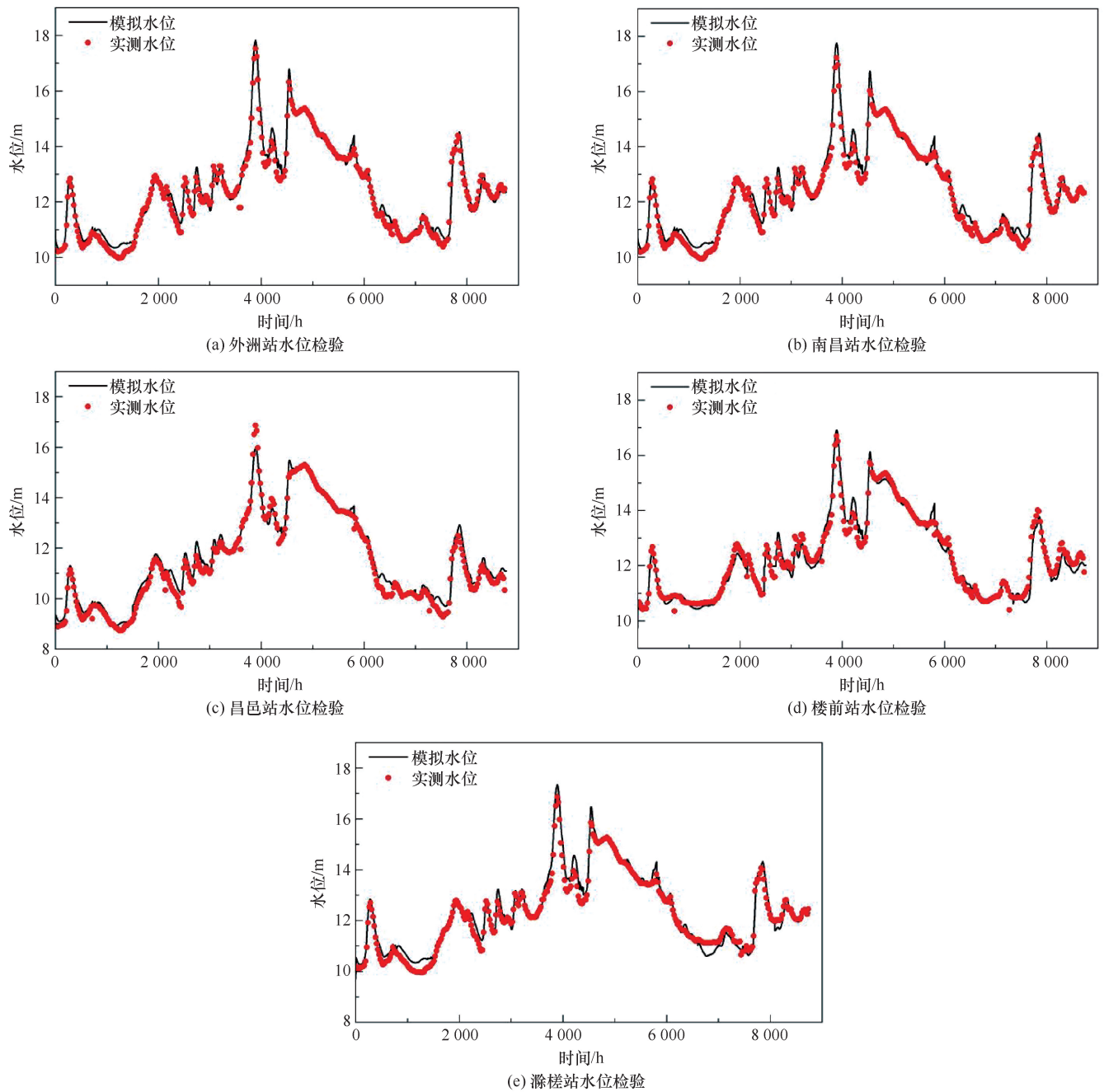


图3 水位逐时验证情况

Fig. 3 Hourly validation of water level

表1 模型验证结果

Table 1 Model validation results

序号	水位站	r	NSE	ME/m	$RMSE/m$	RRE
1	外洲	0.978	0.973	0.113	0.204	0.029
2	南昌	0.977	0.967	0.155	0.227	0.033
3	昌邑	0.983	0.944	0.202	0.335	0.048
4	楼前	0.957	0.954	-0.016	0.251	0.036
5	滁槎	0.969	0.959	0.112	0.239	0.034

由表2可以看出, 多年以来受不同程度的人类活动影响, 赣江尾间的分流比情况变化较大, 要达

到外洲站水位 15.5 m 条件的自然流量要求也从 1 350 m³/s 增加至 4 360 m³/s。由于在南昌枢纽蓄

水达到其目标水位 15.5 m 后, 水位的抬升必然会改变各支河道的水动力特性, 流量、分流比的变化将改变赣江尾间的水动力条件。设计的试验工况如表 3 所列, 其中流量的工况设置考虑了枢纽主要运行期间的枯水期流量, 统计 2000—2019 年 8 月—次年 3 月的外洲逐日平均流量, 95% 保证率下的流量为 $495 \text{ m}^3/\text{s}$, 50% 保证率下的流量为 $1\,070 \text{ m}^3/\text{s}$, 20% 保证率下的流量为 $2\,020 \text{ m}^3/\text{s}$, 在流量超过 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 由于此时水位已经接近或超过 15.5 m, 按枢纽的运行规划此时应闸门敞开, 使河道恢复自然行洪, 此将试验工况流量设置为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。将表 2 中历史上四个阶段的分流比编号为 I、II、III、IV, 以加强不同分流比情况的区分。将四个流量工况与四种分流比工况进行正交试验, 以分析在不同流量条件与不同分流比条件的情况下, 南昌水利枢纽运行期间的赣江尾间水动力分配规律。

表 2 外洲水位为 15.5 m 时不同年份各支分流情况

Table 2 Diversion of branches in different years at water level of 15.5 m at Waizhou station

地形年份	外洲流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	主支/%	北支/%	中支/%	南支/%
1983	1 350	37.0	9.7	29.5	23.8
1998	2 340	43.0	18.5	20.5	18.0
2013	4 290	65.0	5.0	20.0	10.0
2018	4 360	60.0	4.0	24.0	11.0

2.2 分流比优化方法

2.2.1 优化目标

赣江尾间的河道水动力分配不均的问题主要表现在: 低流量时北支、中支和南支的断流, 水面比降差异明显, 各支流速差异大。枯水期的赣江干流流量普遍较低, 流量中位数为 $1\,070 \text{ m}^3/\text{s}$, 80% 的日均流量低于 $2\,020 \text{ m}^3/\text{s}$, 因此对于低流量的情况应特别重视, 在该流量下西河分流占据了主要部分, 主支分得了绝大部分流量, 使得南支、中支和北支河段, 几乎不过流。因此水动力调控的主要目的是恢复河道的流动性, 在南昌枢纽运行后, 可通过蓄水来增加河段的

表 3 试验设计工况

Table 3 Experimental design conditions

工 况	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	分流比 编号	分流比			
			主支/%	北支/%	中支/%	南支/%
1	500	I	37.0	9.7	29.5	23.8
2	500	II	43.0	18.5	20.5	18.0
3	500	III	65.0	5.0	20.0	10.0
4	500	IV	60.0	4.0	24.0	11.0
5	1 000	I	37.0	9.7	29.5	23.8
6	1 000	II	43.0	18.5	20.5	18.0
7	1 000	III	65.0	5.0	20.0	10.0
8	1 000	IV	60.0	4.0	24.0	11.0
9	2 000	I	37.0	9.7	29.5	23.8
10	2 000	II	43.0	18.5	20.5	18.0
11	2 000	III	65.0	5.0	20.0	10.0
12	2 000	IV	60.0	4.0	24.0	11.0
13	4 000	I	37.0	9.7	29.5	23.8
14	4 000	II	43.0	18.5	20.5	18.0
15	4 000	III	65.0	5.0	20.0	10.0
16	4 000	IV	60.0	4.0	24.0	11.0

水量和升高河段的水位来提高水环境承载力, 但由于过流断面的增加, 会使得本就过流量少的河道流速进一步降低, 因此如何通过南昌水利枢纽的合理调控来增加低流速河段的流速是关键问题, 自然情况下各流量下的流速与比降分布情况如表 4 所列。

由表 4 可以看出北支、中支和南支的比降是显著低于主支的, 值得注意的是, 当外洲流量从 $1\,080 \text{ m}^3/\text{s}$ 增至 $1\,980 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 主支比降由 1.503×10^{-5} 显著增大至 2.612×10^{-5} , 这一变化主要源于上游来流增加导致河道水位抬升, 进而促使北支开始分流, 使得主支流量在分汊点后有所减少, 最终导致主支比降的显著变化。各河段比降的差异性直接导致了流速空间分布的不均衡现象, 在全部工况下楼前和滁槎两处的流速较赣江的主支均存在较大差距, 对河道环境的演变十分不利。流速的不足, 会导致各支的水质存在隐患, 流速的增加可以有效提高水中的含氧量, 从而增加 COD 与 TN 的降解速率^[25], 因此应尽可能提高各支流速。有研究报道在河道流速大于 0.1 m/s 时可以有效抑制藻类的过度繁殖^[26-27], 该流速也是鱼

表 4 枢纽调控前的流速与比降分布

Table 4 Distribution of flow velocity and gradient before hub regulation

时间/年-月-日	外洲水位/ m	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	各水文(水位)站流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				各河段比降/ 10^{-5}			
			外 洲	昌 邑	楼 前	滁 槎	主 支	北 支	中 支	南 支
2019-11-01	9.80	501	0.067	0.447	—	—	1.202	—	—	—
2019-09-09	12.20	1 080	0.105	0.663	0.015	0.021	1.503	—	0.021	0.024
2019-01-15	13.24	1 980	0.171	0.907	0.283	0.080	2.612	0.143	0.705	0.176
2019-02-22	14.81	3 830	0.283	1.140	0.703	0.139	3.271	0.324	2.191	0.588

类的产卵繁殖的适宜流速^[28]。流速过大会增加水流对河床的冲刷影响,为了削弱由主流流速过高导致对河床的过度冲刷,将优化目标流速范围确定为0.1~0.2 m/s。

2.2.2 优化方法

枢纽蓄水后,水位抬升能够满足水量需求,但同时会降低水流流速。为优化各支流的水资源承载能力,首先应提高各支流的流速,同时为避免出现局部支流流速过低的情况,本研究采用最大化最小值的方法来确定最优工况,即最大化各支的最小流速。

最大化最小值(max-min)是一种直接针对最差性能进行优化的方法^[29],其目标是提升系统中最薄弱的环节的性能,确保整体公平性或可靠性。它可以避免某些个体或子系统性能过差,适用于资源分配场景。对于各河段的流量分配而言,不同的流量分配模式决定了各支的流速,因此将各支的特征流速作为性能指标,即在不同外洲流量的若干分流比情况中,选择在同一流量下不同分流比情况中最小特征流速最大的一组分流比作为该流量下的最优分流比,公式如下

$$q = \operatorname{argmax}_{q_1, q_2, q_3, q_4} (\min \{v_1(q_1), v_2(q_2), v_3(q_3), v_4(q_4)\}) \quad (9)$$

式中, argmax 为极大值点函数 (Argument of the Maximum), 其返回使目标函数取得最大值时的变量 q_1, q_2, q_3, q_4 的值, $q = (q_1, q_2, q_3, q_4)$ 为最优流量分配方案, 其中 q_1, q_2, q_3, q_4 分别为主支、北支、中支、南支的分泄流量; v_1, v_2, v_3, v_4 分别为主支、北支、中支、南支的特征流速。

河段特征流速值的确定方法为自外洲站控制断面起,沿河道向下游边界方向,按每5 km 间距布设过流断面,在各过流断面上以50 m 为间隔采集流速数据。计算各河段的测点流速平均值,作为优化计算的特征流速值。

2.2.3 约束条件

(1)水闸流量调节能力。要对流量进行重分配,首先要做的是明确下游各支水闸流量的可控范围,即流量调节能力。流量调节的能力取决于各支流实际的过流量,过流量越大,通过水闸调节所引起流量的变化幅度越大。外洲作为该分汊河道系统的分汊前初始节点,其水位与各支的流量密切相关。对2.1.4节水动力模型验证的数据进行分析,剔除了受鄱阳湖顶托影响最严重月份7月的数据,提取出了自然情况下各支流量与外洲站水位之间的关系。

由图4可以看出,各支河道的流量与外洲站处水

位均表现出正相关关系,随着各支流流量的升高,外洲站的水位也随之上涨。并且,在外洲站保持某一水位时,下游各支的过流量是存在上限的,以外洲站水位为15.5 m 时为例,主支的最大过流量不超过2 700 m³/s,北支最大过流量不超过300 m³/s,中支最大过流量不超过1 400 m³/s,南支最大过流量不超过400 m³/s。这反映了各支水闸对流量的控制能力,最高不会超过该支流在外洲一定水位条件下的泄流能力,因此在设计分流比时不宜超出各支流量控制的上限。

(2)生态需求。关于最小生态流量采用流量历时曲线法^[31]和Tennant法^[32]共同制定。依据流量历时曲线法,选择了1999年至2019年8月—次年3月的外洲流量数据进行计算,选取每月的90%保证率的流量进行计算;Tennant法依据观测资料建立的流量和河流生态环境状况之间的经验关系,采用历史流量资料确定年内不同时间段的生态环境需水量。赣江流域属水资源较丰沛地区,应该在“非常好”的生态环境状况评级中取值,枯水期30%丰水期50%。由两种方法取得的赣江尾间最小生态流量具体数值如表5所列。

在确定了枢纽整体下泄流量后,各级分支的最小流量按1983年未受人类活动影响阶段的流量进行选择,由平均外洲流量为500 m³/s时的分流比确定,各支的最小流量如表6所列。

(3)航运需求。“十二五”期间,根据《全国内河航道与港口布局规划》和《江西省内河航运发展规划》要求,通过航道整治,赣江主支(南昌—湖口)156 km 河段定级为Ⅱ级航道;赣江南支(南昌—三江口—瓢山)87 km 河段定级为Ⅳ级航道。在南昌枢纽工程中,建设的主支航道通航标准确定为3 000 t 级的内河Ⅰ级航道,南支航道通航标准确定为100 t 级的内河Ⅲ级航道。

据《内河通航标准》(GB 50139—2014)、《船闸总体设计规范》(JTJ 305—2001),赣江尾间综合整治工程中,主支船闸设计最高通航水位洪水标准为20 a 一遇,设计最低通航水位保证率为98%;南支船闸设计最高通航水位洪水标准为10 a 一遇,设计最低通航水位保证率为95%。外洲站保证率 $P = 98\%$ 和 $P = 95\%$ 的设计流量分别为445 m³/s 和495 m³/s。因此根据航运需求,枢纽整体最小下泄流量应大于495 m³/s。由于主要航道位于主支和南支,因此对主支和南支的最小下泄流量进行限制,各支分配为:主支246.5 m³/s,北支17.4 m³/s,中支140.6 m³/s,南支90.5 m³/s。

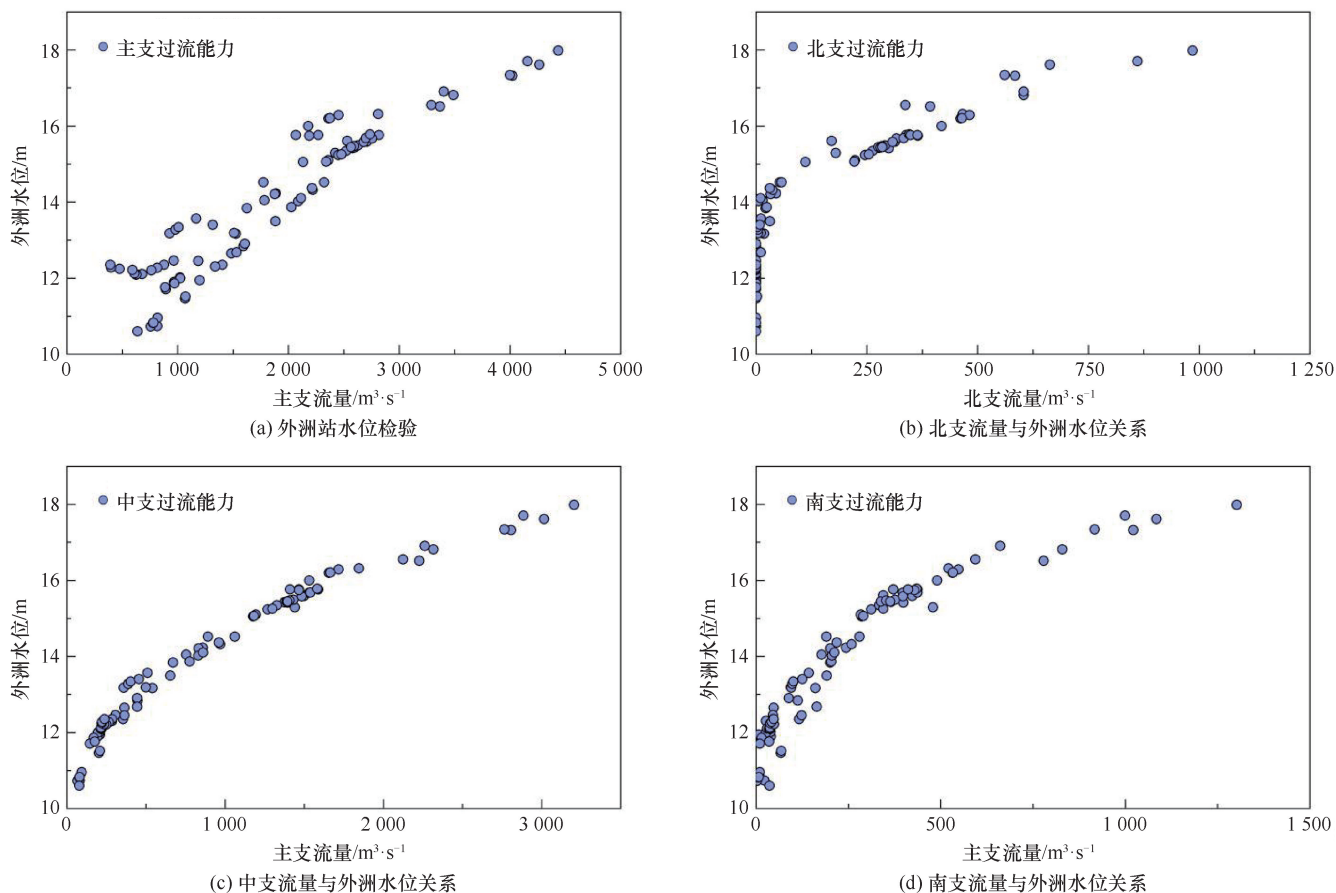


图4 自然条件下外洲水位与各支流量关系

Fig. 4 Relationship between water level at Waizhou station and branch flow rate under natural conditions

表5 流量历时曲线法下的最小流量

 m^3/s

Table 5 Minimum flow rate under flow duration curve method

 m^3/s

方法	1月	2月	3月	8月	9月	10月	11月	12月
流量历时曲线法	387	491.1	722.9	787.9	694	550	477.9	382.8
Tennant法	295	390	724	571	473	345	345	297
最小生态流量	387	491.1	724	787.9	694	550	477.9	382.8

表6 各级分支最小生态流量

 m^3/s

Table 6 Minimum ecological flow rate of different branch levels

 m^3/s

分支	1月	2月	3月	8月	9月	10月	11月	12月
外洲	387.0	491.1	724.0	787.9	694.0	550.0	477.9	382.8
主支	190.8	242.1	356.9	388.4	342.1	271.2	235.6	188.7
北支	13.5	17.2	25.3	27.6	24.3	19.3	16.7	13.4
中支	93.3	118.6	174.5	189.9	167.3	132.6	115.2	92.3
南支	70.1	88.9	131.1	142.6	125.6	99.6	86.4	69.3

3 结果与讨论

3.1 枢纽蓄水后的水动力变化

3.1.1 水位变化

南昌水利枢纽蓄水后, 最显著的变化是其水位的变化, 在枢纽蓄水至 15.5 m 后, 根据试验工况进行水

动力模拟后的水位分布情况如表 7 所列, 由表 7 可以看出在外洲流量小于等于 2 000 m^3/s 时, 外洲水位与各支闸前的水位均保持在 15.5 m 左右, 外洲水位与各支闸前的水位落差在 0.5 m 以内, 且外洲流量越小各支的水位落差也越小。在外洲流量达到 4 000 m^3/s 时, 分流比 I、II 工况下的南支闸前水位降低至 13.52 m

表 7 枢纽蓄水后水位变化

Table 7 Water level variations after hub impoundment

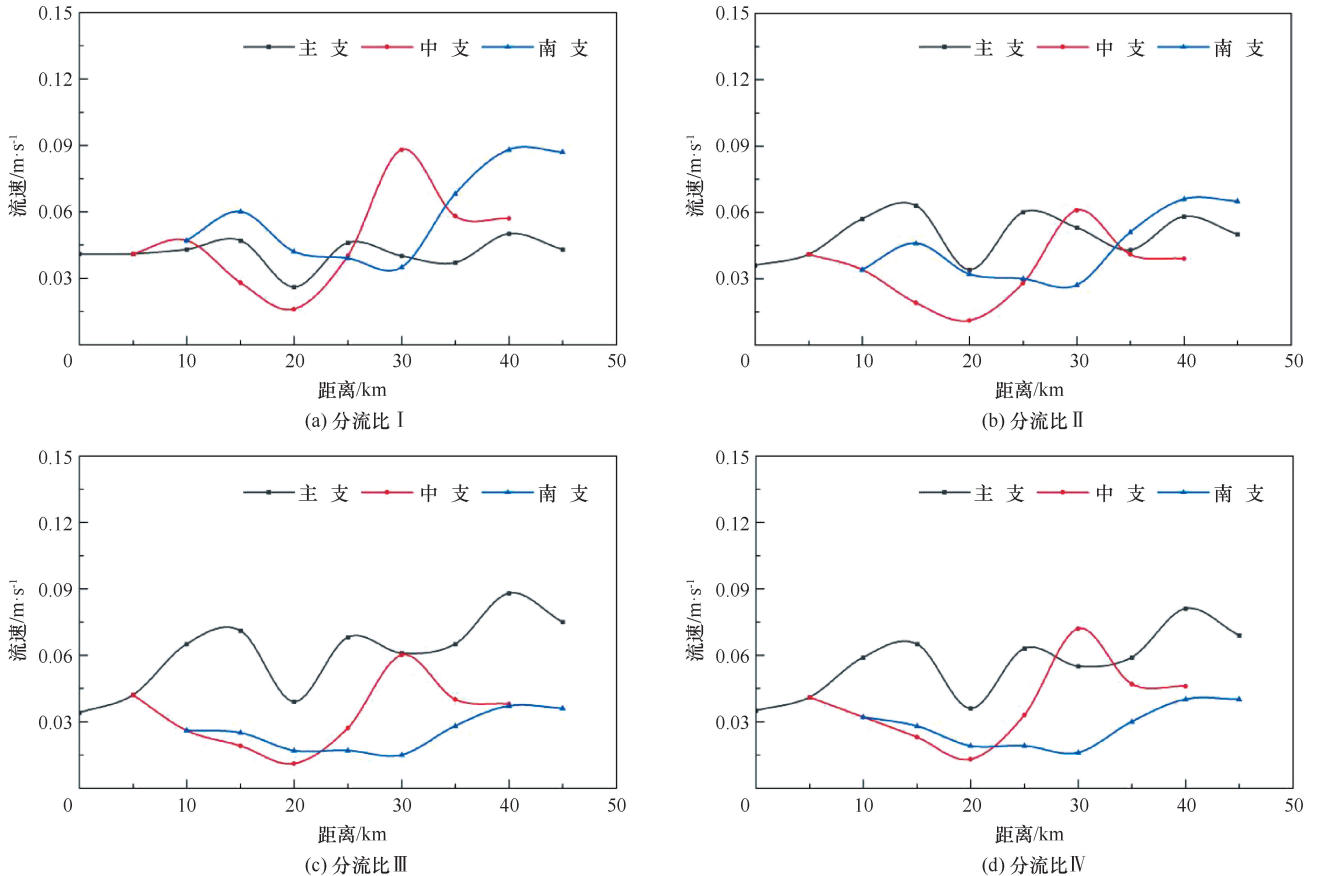
流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	分流比编号	水位/m				
		外洲	主支闸前	北支闸前	中支闸前	南支闸前
500	I	15.50	15.50	15.50	15.49	15.48
	II	15.51	15.49	15.49	15.49	15.49
	III	15.51	15.49	15.49	15.49	15.49
	IV	15.51	15.49	15.50	15.50	15.50
1 000	I	15.51	15.49	15.50	15.48	15.41
	II	15.51	15.48	15.49	15.49	15.45
	III	15.51	15.46	15.49	15.50	15.49
	IV	15.51	15.47	15.50	15.49	15.49
2 000	I	15.55	15.48	15.50	15.41	15.10
	II	15.54	15.42	15.46	15.47	15.30
	III	15.54	15.34	15.44	15.48	15.46
	IV	15.55	15.38	15.46	15.46	15.45
4 000	I	15.82	15.50	15.62	15.26	13.52
	II	15.87	15.40	15.54	15.58	14.73
	III	15.85	15.04	15.46	15.60	15.54
	IV	15.85	15.19	15.52	15.51	15.48

和 14.73 m, 这是由于在该工况下南支的过流量分别为 $952 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $720 \text{ m}^3/\text{s}$, 超过了南支最大的过流能力 $400 \text{ m}^3/\text{s}$, 使得模拟结果出现了异常表现。

3.1.2 流速沿程分布

以河道断面平均流速作为参考指标, 自外洲站开

始向下游各支每间隔 5 km 设置一个流速观测断面, 对不同的分流比、不同外洲流量下的流速纵向分布进行分析。由于北支水闸建于北支分汊入口处, 因此在此不对北支流速展开分析。流速分布如图 5—图 8 所示。

图 5 外洲流量为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时各分支流速沿程变化Fig. 5 Longitudinal variation of flow velocity along each branch under flow rate of $500 \text{ m}^3/\text{s}$ at Waizhou station

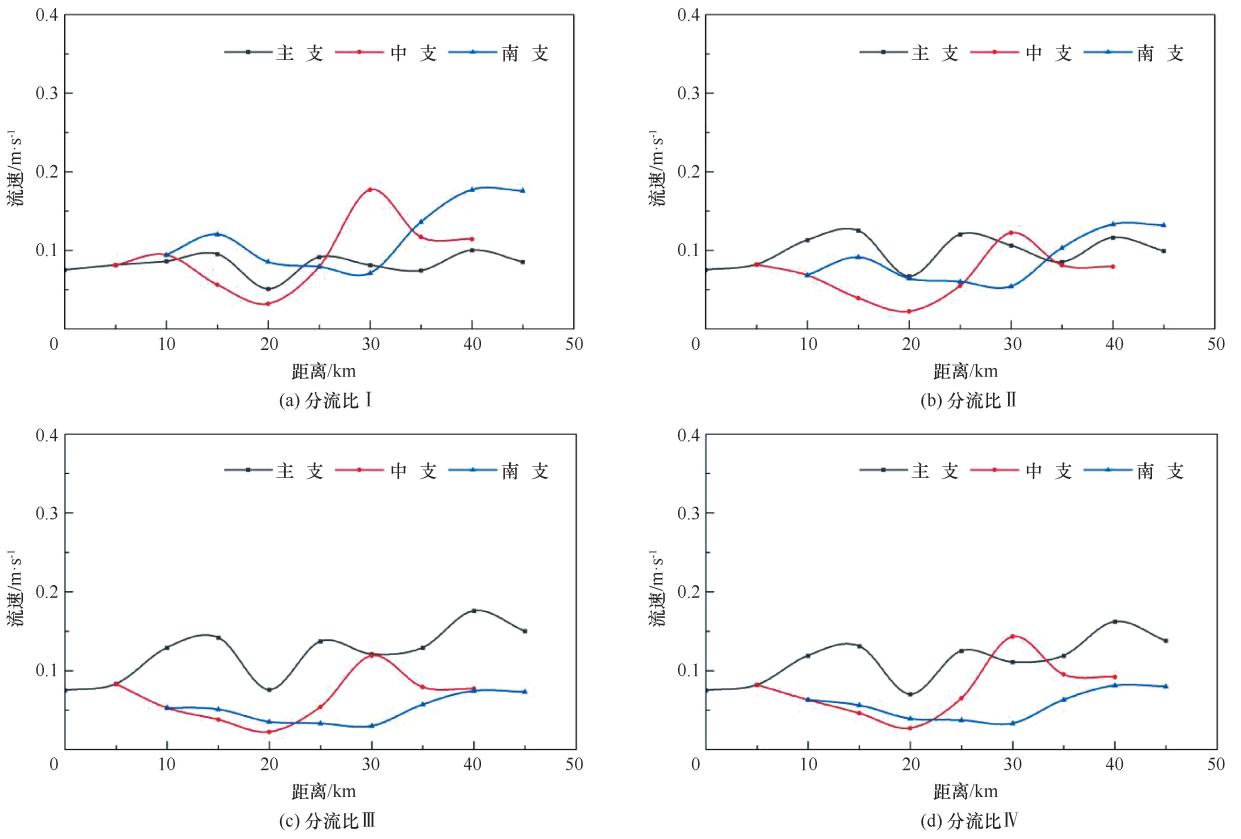


图6 外洲流量为 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时各分支流速沿程变化

Fig. 6 Longitudinal variation of flow velocity along each branch under flow rate of $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ at Waizhou station

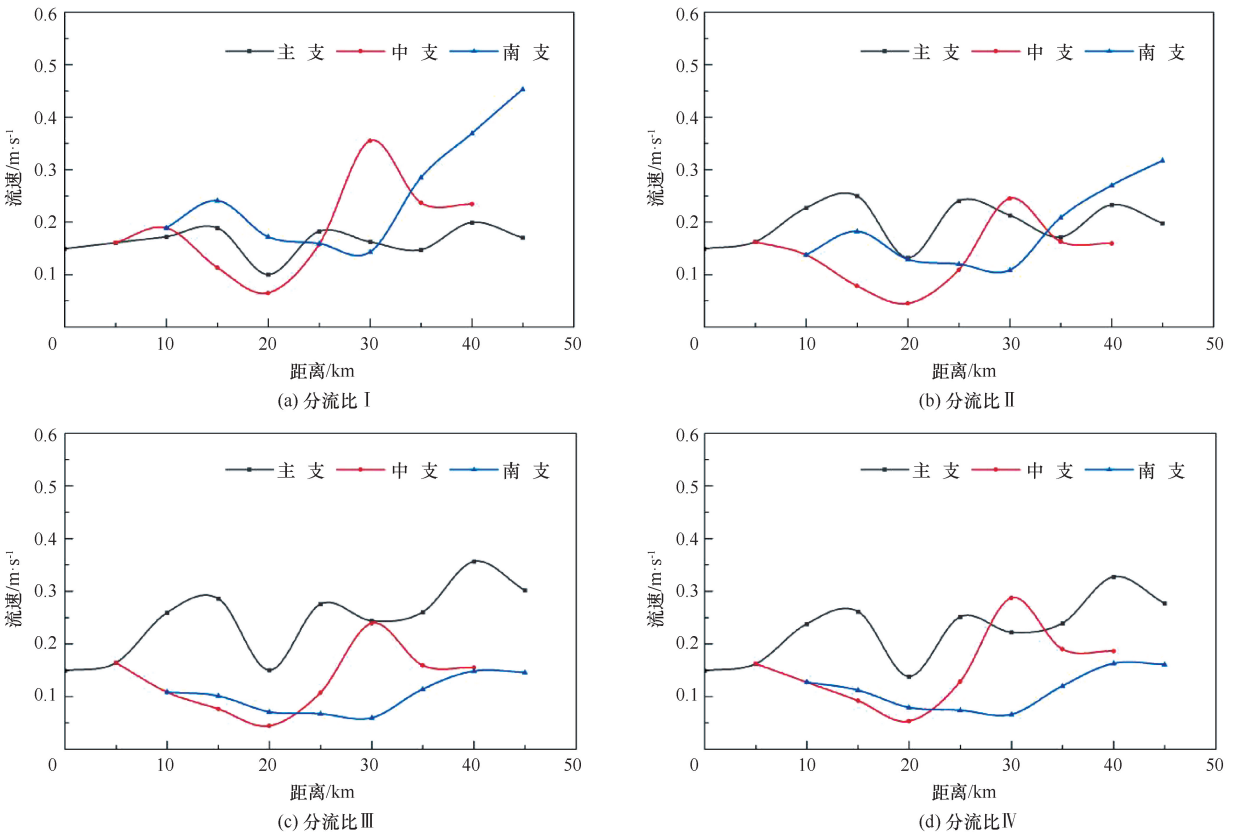
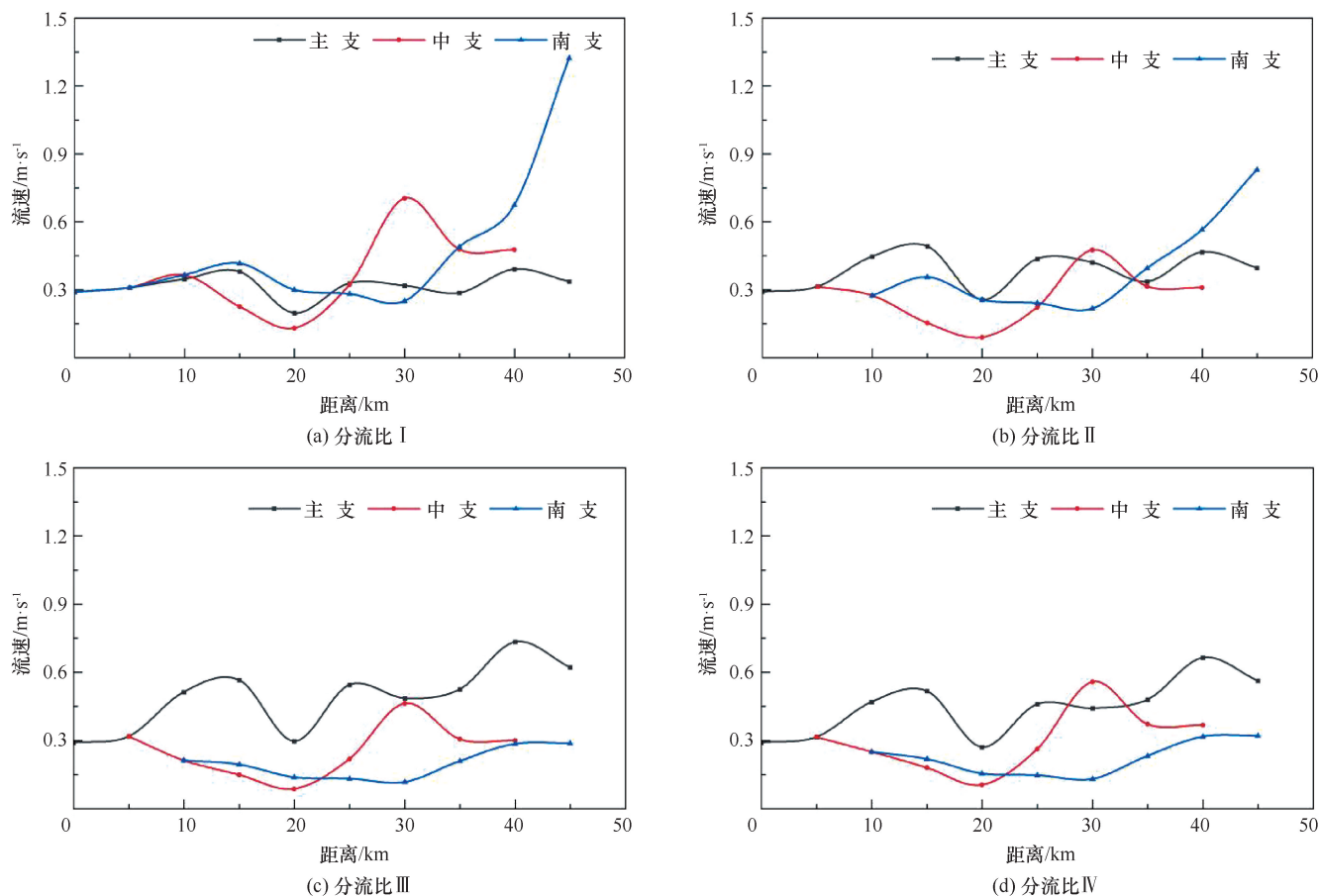


图7 外洲流量为 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时各分支流速沿程变化

Fig. 7 Longitudinal variation of flow velocity along each branch under flow rate of $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ at Waizhou station

图8 外洲流量为4000 m³/s时各分支流速沿程变化Fig. 8 Longitudinal variation of flow velocity along each branch under flow rate of 4 000 m³/s at Waizhou station

外洲流量为500 m³/s时,是接近枯水期95%流量保证率(495 m³/s)的流量,在此工况下可以反映出枯水期水位在15.5 m时的调控效果,整体而言各支的流速在0.01~0.09 m³/s之间,其中不同分流比所引起的变化明显,在1983年分流比I工况下由于中支与南支的分流比较大,因此表现出了最大的流速变化范围,1998年分流比II工况下其表现出的流速变化范围最小,各支的最高流速都表现在0.06 m/s左右。在2013年和2018年分流比III、IV工况下主支的分流比有所增大,此时主支的流速相比中支和南支占据优势。

在外洲流量为1000 m³/s时,流速的沿程分布模式与500 m³/s工况表现相似,各支断面平均流速有所提高,整体流速范围在0.02~0.2 m/s之间,各支流速的大小关系与流量为500 m³/s工况下的表现相同。

在外洲流量为2000 m³/s时,各支的流速相比流量为1000 m³/s时均有所提高,整体流速范围在0.05~0.5 m/s之间,其中值得注意的是南支在较大

分流比时,其最下游接近水闸处的流速表现出较为明显的增长。其余分流比工况下的流速沿程分布规律以及大小关系表现与500 m³/s工况、1000 m³/s工况相似。

在外洲流量为4000 m³/s时,在分流比I和分流比II工况下均出现了南支闸前流速突然升高的现象,这与3.1.1节中出现的南支水位异常有所对应。由此可知,在水闸运行与最优分流比设置时,应确保各支的流量在其泄流能力之内。

3.1.3 流速变化规律

为单独分析各支流速随其通过流量的变化情况完善流量流速关系,补充了主支入北支口的断面流速数据作为北支的特征流速(见图9)。

由图9可以发现各支流速与河道流量呈现出接近线性相关的关系。由于整体的试验是在外洲水位为15.5 m的情况下进行的,同时可以观察到各支在闸前的水位也接近15.5 m,沿程水面比降很小,因此各支河道的过流面积变化不大,故随着流量变化流速显现出近似线性变化。此外各支平均流速随流量变化

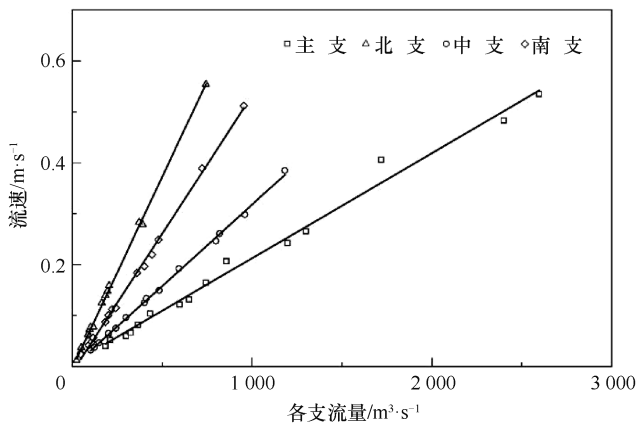


图9 各支特征流速与流量关系

Fig. 9 Relationship between characteristic flow velocity and flow rate of each branch

的变化率有所不同, 主支流速的变化随流量的增大最不敏感, 中支的变化率居中, 北支流速的变化率随流量变化最为敏感, 南支的敏感性仅次于北支, 因此在未来水闸调控与分流比优化时, 可以优先考虑控制主支流量来给流量不足的分支补充流量。

3.2 最优分流比

由 3.1 节的结果表明, 在南昌水利枢纽运行蓄水后, 赣江尾间的流速相较未蓄水时明显降低, 在 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时各河段各断面的流速均低于 0.1 m/s , 平均流速在 $0.015 \sim 0.065 \text{ m/s}$ 之间, 未达到目标流速 $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$ 的范围, 在此条件下应尽量抬高各支的流速以满足流速需求, 因此在求解时以各支的最小特征流速为指标, 将使最小流速在众多可行解中最大的解作为最优解, 即最优分流比。

下游各支在约束范围内时流量与各支汊平均流速呈现出线性关系(见图 9), 对于有线性关系的最大化最小值问题而言, 可以通过将最大化最小值问题转化为线性规划问题来求解不同流量下的最优分流比, 相较于遗传算法和粒子群等启发式算法, 近似线性的流量流速关系采用线性规划方法可以通过标准的求解算法(如单纯形法、内点法等)进行求解, 计算效率高可以得到全局最优解。将各支的流量与特征流速关系拟合为线性方程, 采用 python 编写优化计算程序, 调用 scipy.optimize 库中的 linprog 线性优化模块用以求解最佳分流比。求解的外洲流量范围是流量为 $495 \sim 4800 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中 $495 \text{ m}^3/\text{s}$ 为最小下泄流量界限, $4800 \text{ m}^3/\text{s}$ 为外洲水位为 15.5 m 时所能通过的最大流量, 超过这一流量时水闸将全部开启不再调控河道恢复自然行洪。

图 10 为不同外洲流量条件下各支流最优过流量

的计算结果。本研究采用线性规划方法进行求解, 其理论解应呈现线性特征。由于各支流通流能力与生态流量要求存在约束限制, 实际最优解表现为分段线性(折线)形态。各支汊泄流能力的显著差异导致最优分流比随外洲来流量的变化呈现动态调整特征。

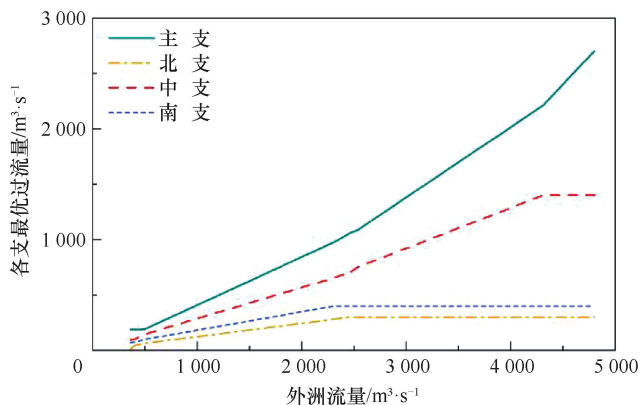


图10 外洲流量与各支最优分流比的关系

Fig. 10 Relationship between flow rate at Waizhou station and optimal diversion ratio of each branch

图 11 为各支流水位与外洲流量的响应关系。随着外洲来流量的增加, 各支流流速呈现明显的上升趋势。具体表现为, 当外洲流量达到 $2335 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 南支的流速率先达到上限, 此时南支的流量已经达到其最大泄流能力的 $400 \text{ m}^3/\text{s}$, 紧接着当外洲流量达到 $2469 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 北支流量达到最大泄流量。此后, 随着外洲流量的继续增加, 仅主支和中支仍具备泄流余量, 导致两分支流速增长速率显著提升。当外洲流量达到 $4228 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 中支泄流量达到上限, 只剩主支有剩余的泄流冗余, 随着外洲流量达到 $4800 \text{ m}^3/\text{s}$, 各支均达到其最大的泄流能力值, 在此时若有更大流量, 应保持所有闸门的全开状态使河道自然行洪。

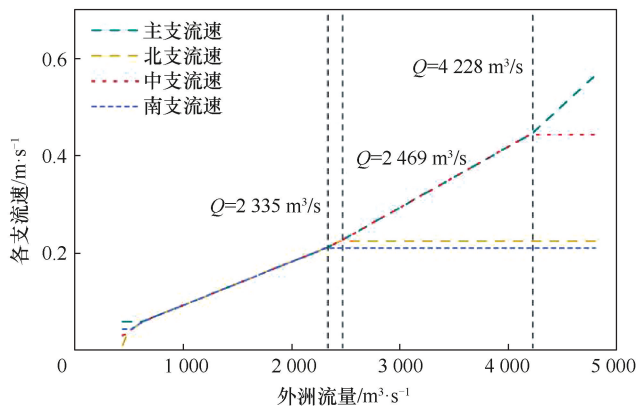


图11 优化后外洲流量与各支流流速关系

Fig. 11 Relationship between flow rate at Waizhou station and flow velocity of each branch after optimization

表 8 典型工况下的优化分流比

Table 8 Optimized diversion ratio under typical operating conditions

外洲流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	各支分流比/%				各支流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			
	主	北	中	南	主	北	中	南
500	39	13	29	20	246.5	49.5	113.5	90.5
1 000	41	12	29	18	408	123	287	182
2 000	42	12	28	17	843	243	567	347
4 000	48	8	35	10	1 900	300	1 400	400

3.3 优化结果的验证

针对 3.2 节中确定的最优分流比, 利用水动力模型对其效果进行模拟验证。表 8 提取了在外洲流量为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的最优分流比计算结果, 与 1983 年、1998 年、2013 年、2018 年外洲水位为 15.5 m 的分流比进行对比, 来验证优化效果。

图 12 展示了不同年份分流比下各分支河道的特征流速的分布。在外洲流量 $\leq 2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 优化工况各支特征流速呈现显著的空间均衡特性, 较大幅度地提升了各支的流速下限。具体而言, 当外洲流量为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 优化工况各支流流速值域为 $0.041 \sim 0.049 \text{ m/s}$, 相比各年工况中下限流速最高的 1983 年工况, 将流速最低的北支提高了 18.9% , 对于枯水期流速不足的情况有了很大改善; 在 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下, 优化工况流速分布范围控制在 $0.083 \sim 0.093 \text{ m/s}$, 相比各年中较优的 1983 年工况的流速范围 $0.075 \sim 0.12 \text{ m/s}$, 将各支的流速下限值提高了 12.3% 以上; 在 $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下优化后流速范围 $0.16 \sim 0.19 \text{ m/s}$, 对比各支将流速下限提升了 18.9% 以上, 同时更明显的是降低了南支的流速, 从 0.25 m/s 降低至 0.18 m/s , 使得所有分支的流速都处在 $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$ 的最优流速范围内, 显示出更优的流速协调性。在外洲流量为 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 此时南支与北支的流量达到在 15.5 m 水位的泄流能力上限, 多余的流量由主支和中支承担, 在最优分流比情况下, 各支的最大流速限制在 0.5 m/s 以下, 均低于其他分流比的最大流速, 在超过起动流速后, 侵蚀速率是指数级增长的^[33], 因此对于特征流速上限的降低, 可以有效减轻对于河床冲刷的影响。

优化结果的流速模拟结果如图 13 所示, 可以发现流速较高的区域主要分布在裘家洲至扬子洲区间、主支、中支和南支的下边界区域, 流速较低的区域在礁矾头向中支分汊段。各支的流速分布较为均匀, 并未出现局部极值的情况。综上所述, 该分流比优化方法在解决赣江尾间水动力空间不均匀性问题上, 低流

量时可以有效提高各支的流速下限。在高流量时可以降低流速过高对河道冲刷的影响, 整体表现出较好的优化效果。

3.4 结果讨论

3.4.1 调控方法对比分析

赣江尾间区域与常见的平原河网多分支、流量小、流速低的特征不同, 有流量基数大, 分汊数量少、河道宽阔、响应迅速等特点。由于河道的水动力调控措施较少(仅有四座水闸)、控制节点少, 因此传统的平原河网的调节方法, 如提高连通性^[34]、泵站增流^[35]等方法不能有效地调节赣江尾间的水动力。在传统的调度方法中, 一般是拟定几组调整工况, 分析不同调节方式下的区别, 再从中选优^[36]。近年来, 部分研究尝试采用神经网络或机器学习等^[15,34]方法进行水动力调控。这些方法虽然具备一定的优化能力, 但往往建立在一维简化模型或经验性参数映射的基础上, 缺乏对于二维水动力机制的阐释, 且易产生难以解释的“黑箱”式控制行为, 降低了实际应用中的可接受性与安全性。相比之下, 本文提出的调控方法则更契合赣江尾间的水力特征。在枢纽蓄水后的工况下, 由于低流量时高水位低比降的特性, 使得各支流在 15.5 m 等水位线附近, 流速与流量之间呈现近线性关系。基于该特性, 本文采用线性规划方法构建调控目标函数, 在预测不同流量情景下支流流速变化的基础上, 优化各支最低流速。基于水动力线性响应和线性规划的调控方法, 在赣江尾间这一特殊区域体现出灵活、可解释和效率高的优越性, 对于水位变化小、比降小的其他调控场景也有一定的适用性。但也由此, 本文中的方法存在一定的局限性, 主要体现在模型假设流量与流速呈线性响应关系, 当实际水动力过程呈现显著非线性特征时模型精度可能降低。

3.4.2 相同案例研究对比分析

近年来, 南昌水利枢纽的建设对赣江尾间河段的水文过程产生了显著影响, 相关研究成果为本研究提供了重要的参考依据。李晓文^[37]对赣江尾间各河段深泓线的研究表明, 北支、中支和南支的河床高程普

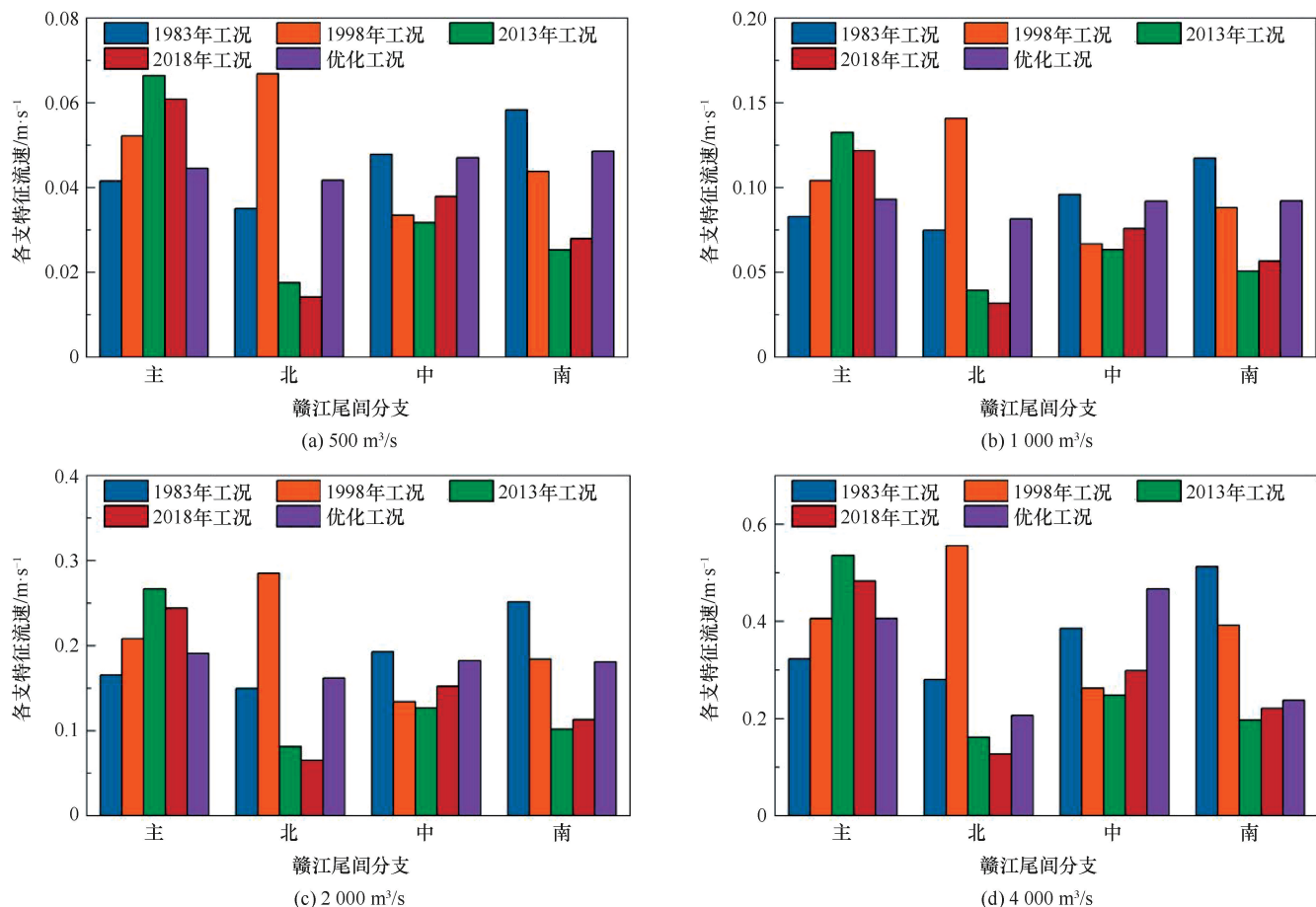


图 12 外洲流量优化结果与不同典型工况下的各支流流速对比

Fig. 12 Comparison between optimization results and flow rates of different branches under different typical operating conditions of Waizhou Station

遍在 10 m 左右, 其中北支最高处可达 12 m。这一发现很好地解释了在较低流量、低水位条件下北支、中支和南支出现的断流现象。LU 等^[38]针对南昌水利枢纽对赣江尾闾水文影响的研究采用了 1983 年的分流比分配模式。其研究结果显示, 在丰水年(2010 年)的调控期间(8 月一次年 3 月), 其中 10 月一次年 3 月各支流闸前水位的月平均值维持在 15.18~15.63 m 之间, 且多数月份的平均水位为 15.5 m。这一结果与本研究的模拟结果高度吻合, 有效验证了本文研究方法的可靠性。此外, LU 等^[38]的研究还指出, 在枯水年通过水闸调控可使枢纽水量增加 2.5~18.7 亿 m^3 , 将总水量维持在约 40.1 亿 m^3 的水平。这种高水位的维持不仅降低了水位对流量变化的敏感性, 也从侧面支持了本研究中采用的线性假设的合理性。XIA 等^[39]通过物理模型试验进一步证实, 在枯水期将水位抬升至 15.5 m 可使赣江尾闾河段的水域面积增加 56%, 对缓解极端枯水条件下的水质恶化和生态退化问题具有重要作用。本研

究在以上研究成果的基础上展开, 所得结论与既有研究相互印证, 保证了研究结果的科学性和准确性。

3.4.3 研究不足与未来方向

本研究基于 15.5 m 基准水位条件建立了分流比优化模型, 由于研究仅针对单一水位 15.5 m 工况, 尚未建立多水位条件下的分流比响应关系, 同时未耦合降雨径流等关键水文过程, 这使得模型在复杂气象条件下的适用性受到一定限制。此外, 当前的静态流量分配方案未能充分考虑实际管理中的动态调控需求, 而现有研究表明通过闸门运行控制实施流量脉冲调控, 可能有效改善河道水动力条件, 进而提升水环境容量和生态系统健康水平^[40]。因此, 未来研究需要在现有基础上进一步深化, 重点考虑不同水位条件下的水闸调控策略, 建立动态优化模型, 同时耦合气象水文要素与生态需求, 以全面提升赣江尾闾水动力管理的精准性和适应性, 为实际工程应用提供更科学的技术支撑。

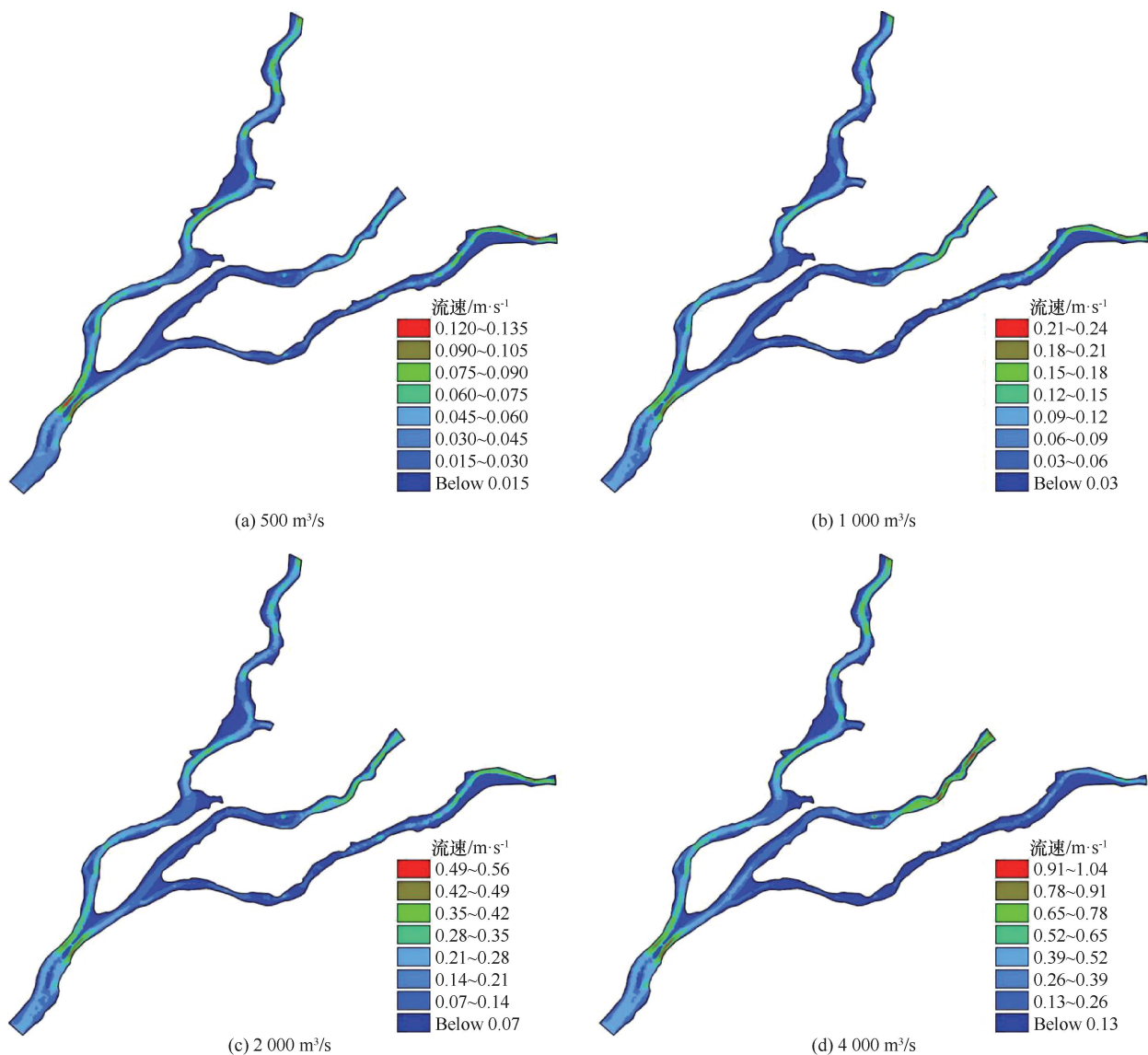


图 13 外洲流量优化结果的流速空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of flow velocity under optimization results of Waizhou Station

4 结论

(1) 在赣江尾间河段通过南昌水利枢纽进行水动力干预时, 各支的流速响应取决于经过各支的流量, 分汊河段之间的相互影响不明显, 在南昌枢纽蓄水至 15.5 m 时赣江尾间各支的断面平均流速与过流量表现出线性关系, 其中流速受流量影响敏感性从强到弱分别为北支、南支、中支和主支。

(2) 以最大化最小值各支流流速的方法确定了赣江尾间水动力空间优化的最优的分流比, 该分流比受外洲流量影响, 各支的最大流速受各支最大过流能力决定。最优分流比条件下, 随着上游来流量的增大南支最先达到过流极限, 随后是北支、中支和主支。

(3) 通过南昌水利枢纽的优化调度, 采用科学的

分流比配置流量, 可有效缓解赣江尾间河段水动力分布不均的问题, 在确保满足生态基流和航运最低需求的前提下, 显著降低各分汊河段间的流速差异, 使水动力分布更加均衡, 为未来赣江尾间流域开展多目标水资源优化配置提供理论支撑和决策依据。

参考文献 (References):

- [1] 陈界仁, 张婧, 罗春, 等. 赣江下游东西河分流比变化分析[J]. 人民长江, 2010, 41(6): 40-42.
CHEN J R, ZHANG J, LUO C, et al. Analysis of diversion ratio for downstream of Ganjiang River[J]. Yangtze River, 2010, 41(6): 40-42.
- [2] 阚光远, 李纪人, 喻海军, 等. 基于水热平衡的分布式水文模型研究与应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(1): 15-27.

- KAN Guangyuan, LI Jiren, YU Haijun, et al. Development and application of a distributed hydrological model based on water-heat balance[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(1): 15-27.
- [3] 陈界仁, 刘涵心, 吕婷婷. 赣江尾间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 J R, LIU H X, LU T T. Analysis of Low water level variation and cause for Ganjiang trail channel [J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(10): 28-31.
- [4] 戴会超, 毛劲乔, 蒋定国. 大型水利水电工程水沙生态环境调控研究进展[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(5): 118-125.
- DAI H C, MAO J Q, JIANG D G. Research progress of water-sediment and ecological environment control of large hydropower projects[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(5): 118-125.
- [5] 肖洋, 宋成成, 李开杰, 等. 赣江外洲站近 50 年水沙变化规律[J]. *水利水运工程学报*, 2011(4): 126-130.
- XIAO Y, SONG C C, LI K J, et al. Variation of runoff and sediment load at Waizhou hydrologic station in Ganjiang River in the last 50 years[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2011(4): 126-130.
- [6] 郭程程, 刘惠英. 赣江中游禾水河水沙变化特征及影响因素分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(5): 105-117.
- GUO C C, LIU H Y. Analysis of water and sediment variation characteristics and influencing factors in Heshui River along middle reaches of Ganjiang River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(5): 105-117.
- [7] 唐立模, 肖洋, 周洪都, 等. 赣江东西河分流比影响因素研究[J]. *水利水运工程学报*, 2011(4): 64-68.
- TANG L M, XIAO Y, ZHOU H D, et al. Research on the effect factors of flow diversion ratio in Ganjiang River [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2011(4): 64-68.
- [8] 黄志文, 许新发, 唐立模, 等. 赣江入鄱阳湖尾间东西河分流比变化规律分析[J]. *人民长江*, 2017, 48(24): 26-30.
- HUANG Z W, XU X F, TANG L M, et al. Analysis on variation of flow diversion ratio at tail-streams of Ganjiang River [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(24): 26-30+51.
- [9] 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 B, WU N H, XU X F, 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.
- [10] 周苏芬, 黄志文, 唐立模, 等. 赣江尾间多级分叉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 S F, HUANG Z W, TANG L M, 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.
- [11] 任长江, 赵勇, 龚家国, 等. 水质标识指数法在赣江尾间段水质评价中的应用[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(6): 451-458.
- REN C J, ZHAO Y, GONG J G, et al. Application of a water quality identification index to evaluate the Ganjiang River estuary [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(6): 451-458.
- [12] 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(S2): 26-29.
- HUANG B B, YAN D H, LI Q P. Analysis of water environment evolution and driving factors in the tail section of Gan River [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(S2): 26-29.
- [13] SHI B S, CHENG X J, PAN J H, et al. Impact of water depth and flow velocity on organic matter removal and nitrogen cycling in floating constructed wetlands[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 954: 176731.
- [14] HUANG F, OCHOA C G, GUO L D, et al. Investigating variation characteristics and driving forces of lake water level complexity in a complex river - lake system [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, 35(5): 1003-1017.
- [15] TANG H W, YUAN S Y, CAO H. Theory and practice of hydrodynamic reconstruction in plain river networks [J]. *Engineering*, 2023, 24: 202-211.
- [16] 白慧文, 甄晨曦, 张鹏, 等. 基于 EFDC 模拟的闸坝联合调控水动力控藻研究[J]. *北京水务*, 2023(6): 72-78.
- BAI H W, ZHEN C X, ZHANG P, et al. Research on gate-dam joint adjusting hydrodynamic conditions to control algae levels based on EFDC simulating [J]. *Beijing Water*, 2023(6): 72-78.
- [17] 徐存东, 訾亚辉, 黄嵩, 等. 基于 MIKE 21 的圩区河网水动力调控方法研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(7): 161-170.
- XU C D, ZI Y H, HUANG S, et al. Research on the hydrodynamic regulation method of river network in polder area based on MIKE 21 [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(7): 161-170.
- [18] LI X Z, LEI G C, LI Y L, et al. Assessing hydrodynamic effects of ecological restoration scenarios for a tidal-dominated wetland in Liaodong Bay (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 142339.
- [19] GAO C, WANG Z Y, JI X M, et al. Coupled improvements on hydrodynamics and water quality by flowing water in towns with lakes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(16): 46813-46825.
- [20] BAI T, KANG Y, LIU D, et al. Study on watershed ecological water replenishment coupling hydrodynamic and reservoir operation [J]. *Water Resources Management*, 2024, 38(8): 3071-3092.
- [21] 李燕, 金振奎, 高白水, 等. 汉口滩沉积特征及沉积模式: 以鄱阳湖赣江三角洲汉口滩为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1678-1688.
- LI Y, JIN Z K, GAO B S, et al. Sedimentary characteristics and model of branch mouth bar: A case study of branch mouth bar in Ganjiang Delta of Poyang Lake [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1678-1688.
- [22] 许新发, 黄志文, 周苏芬, 等. 不同整治工程条件下赣江尾间河网水流特性试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(7): 7-13.
- XU X F, HUANG Z W, ZHOU S F, et al. Effects of regulation

- projects on flow characteristics in tail channels of Ganjiang river[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(7): 7-13.
- [23] 江西省水利科学院. 赣抚尾间综合整治工程之赣江下游尾间综合整治工程可行性研究报告[R]. 南昌: 江西省赣抚尾间整治有限公司, 2020.
- Jiangxi Academy of Water Science and Engineering. Feasibility study report on the comprehensive improvement project of the lower reaches of Ganjiang River (Ganfu Weilu Project) [R]. Nanchang: Jiangxi Ganfu Weilu Improvement Co. , Ltd. , 2020.
- [24] 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 Y C, LI X W, XU H J, 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.
- [25] KANG M X, TIAN Y M, ZHANG H Y, et al. Effect of hydrodynamic conditions on the water quality in urban landscape water[J]. Water Supply, 2022, 22(1): 309-320.
- [26] SUN Y Y, YIN X A, MAO X Q, et al. Suitable weir heights to improve the provision of environmental flows in urban rivers [J]. Engineering, 2021, 7(2): 187-194.
- [27] SUN L F, WU L X, LIU X B, et al. Reducing the risk of benthic algae outbreaks by regulating the flow velocity in a simulated South-North water diversion open channel [J]. International journal of environmental research and public health, 2023, 20(4): 3564.
- [28] 华祖林, 董越洋, 褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 140-144.
- HUA Z L, DONG Y Y, CHU K J. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 140-144.
- [29] ZARGARI S, KHALILI A, WU Q Q, et al. Max-min fair energy-efficient beamforming design for intelligent reflecting surface-aided SWIPT systems with non-linear energy harvesting model [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 5848-5864.
- [30] MATEOS-NÚÑEZ D, CORTÉS J. Distributed saddle-point subgradient algorithms with Laplacian averaging [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(6): 2720-2735.
- [31] 王青梅, 吴明官. 黑龙江省境内河流生态需水量计算方法研讨 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(10): 35-38.
- WANG Q M, WU M G. Discussion on calculation method of river ecological water demand in Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2021, 49(10): 35-38.
- [32] 陈在妮, 刘宏高, 黄科威, 等. 大渡河干流已建水电站生态基流目标值复核分析[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(1): 50-57.
- CHEN Z N, LIU H G, HUANG K W, et al. Assessment of ecological base flow targets for cascaded hydropower plants on Dadu River [J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(1): 50-57.
- [33] YAN H X, SEDIGHI M, JIVKOV A. Modelling the effects of water chemistry and flowrate on clay erosion [J]. Engineering Geology, 2021, 294: 106409.
- [34] YANG S, YANG G S, LI B, et al. Water quality improves with increased spatially surface hydrological connectivity in plain river network areas [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 377: 124703.
- [35] WANG H, SHEN Z L, ZENG Y C, et al. Connection between anthropogenic water diversion and hydrodynamic condition in plain river network [J]. Water, 2021, 13(24): 3596.
- [36] YANG H Y, WANG J Q, LI J H, et al. Modelling impacts of water diversion on water quality in an urban artificial lake [J]. Environmental Pollution, 2021, 276: 116694.
- [37] 李晓文. 赣江尾间河网区非恒定流数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2021.
- LI X W. Numerical simulation of unsteady flow in the terminal network of Ganjiang River [D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2021.
- [38] LU J G, FU Y M, LI X F, et al. Impact of the comprehensive remediation project on hydrological conditions in the lower reaches of the Ganjiang River [J]. Water Science & Technology, 2024, 89(9): 2577-2592.
- [39] XIA Y, LIU Y, WANG Z C, et al. Damage Inflicted by Extreme Drought on Poyang Lake Delta Wetland and the Establishment of Countermeasures [J]. Water, 2024, 16(16): 2292.
- [40] LV X L, YANG Z F, HU P, et al. Quantifying Environmental Flow in the Form of Pulse Flow for Fish Protection [J]. Water, 2023, 15(15): 2820.

(责任编辑 王海锋)