

· 航道及通航建筑物 ·



受顶托作用的河道水流运动特征研究进展*

王金洋^{1,2}, 假冬冬^{1,3}, 杨俊^{1,2}, 陈小娜^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098)

摘要: 回水顶托现象普遍存在于世界各大河湖之中, 常导致河流上游河段壅水, 易在丰水期引发洪涝灾害, 威胁河流两岸人民群众的生命财产安全。受顶托河道水流运动复杂、影响因素较多, 研究其水流运动特征随各影响因素的变化规律, 对流域防洪、港口航道开发及河湖综合治理具有重要意义。从受顶托河流水流运动基本特征及其影响因素、河道水流运动特征对顶托的响应规律、河道水流受顶托程度表征方法等方面, 对当前该领域国内外研究成果进行总结, 对存在的不足与研究趋势进行分析, 提出尚需深入研究的重点方向, 以期受顶托影响下的河道水流运动特征及其综合治理研究提供参考。

关键词: 回水顶托; 水流运动; 表征方法; 研究进展

中图分类号: U612; TV147

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0101-09

Study progress of movement characteristics of river flow affected by backwater

WANG Jinyang^{1,2}, JIA Dongdong^{1,3}, YANG Jun^{1,2}, CHEN Xiaona^{1,2}

(1. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of Ministry of Transport,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Water Conservancy & Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: The phenomenon of backwater is commonly observed in major rivers and lakes worldwide, often leads to upstream water stagnation and increasing the risk of flooding during high-water periods, which threatens lives and property of people living along the riverbanks. The complex variations in river flow movement characteristics caused by backwater effect, influenced by numerous factors, studying its hydrodynamic patterns and impacts is crucial for flood control, port and waterway development, and comprehensive basin management. We preliminarily analyze and summarize domestic and international research findings in this field, focusing on three aspects, such as the fundamental characteristics and influencing factors of rivers affected by backwater, the hydrodynamic responses of rivers to backwater, and methods for quantifying the degree of backwater influence on water flow. Additionally, we analyze research gaps and trends, propose key directions for future research, which can provide insights and references for studying river flow movement characteristics under backwater effect and comprehensive regulation.

Keywords: backwater effect; flow movement; characterization method; study progress

回水顶托简称顶托, 是指河道水流向下游流动过程中, 受下游水流或结构物阻碍作用而变缓,

在上游河段一定区域内形成壅水的水文现象^[1]。因情况复杂、影响因素多, 在不同地域引起顶托

收稿日期: 2024-05-03

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209501); 国家自然科学基金项目(52079080、U2040215)

作者简介: 王金洋(1999—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通信作者: 假冬冬(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 博士生导师, 从事港口、航道及河流动力学研究。

E-mail: ddjia@nhri.cn

的主导因素也不尽相同,其中最常见的水顶托一般由交汇区地形地势或干、支流季节性来流差异引起,影响回水区域内河道水流条件和冲淤形态变化。干支流顶托现象见图1^[2]。

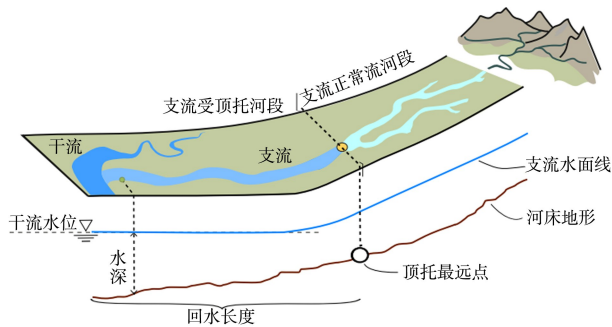


图1 干支流顶托现象

Fig. 1 Backwater phenomenon of main and tributary stream

顶托现象普遍存在于世界各大河湖之中,影响其作用区域内河流的水流运动。受顶托影响的河流水流下泄受阻,各水流运动要素分布特征(简称水流运动特征),如水位、流速等发生变化,一方面表现为水位-流量关系散乱,影响其航道通航及工程规划设计;另一方面表现为汛期河道上游持续高水位继而引发洪灾,威胁河流沿岸人民群众的生命财产安全^[3]。如印度的恒河、巴西的亚马逊河发生的显著顶托现象^[4-5],我国长江中下游、黄河中上游、淮河和松花江等流域的部分支流也存在季节性顶托现象,比较著名的有:受长江顶托的鄱阳湖与洞庭湖^[6]、受黄河顶托的汾河^[7]、受松花江顶托的嫩江^[8]等。针对顶托现象,迄今有诸多学者开展了一系列相关理论研究和模型分析^[9-10],尤其针对长江中下游河段与“两湖”相互顶托研究,为河湖顶托规律研究与河流综合治理提供了重要参考。近年来,随着航运迅速发展,河流顶托问题日益突出,业内主要关注干流动态顶托下,支流水流运动特征的时空变化规律,并结合航道通航条件,制定相应的规划及通航方案^[11]。因此,正确认识受顶托河流的影响因素及其水流运动特征对顶托的响应规律,并对顶托程度进行合理的表征,是受顶托河流防洪调度与港口航道建设的一项重要基础,具有重要的理论意义与科学价值。

目前,关于无顶托现象河流的水流运动分析已开展了大量的研究工作^[12-13],为江河治理与建设提供了科技支撑。而对于存在顶托现象的河流,其河道水流运动除了与来流条件、河道形态相关,还受下游顶托的影响,其水流运动变化复杂、影响因素较多,有关水流运动特征随各影响因素的变化规律的研究尚待深入。本文在分析顶托现象的基础上,对国内外相关研究成果从受顶托河道影响因素及其水流运动基本特征、受顶托河道水流运动特征对顶托的响应规律、支流受顶托程度表征方法等方面进行总结,分析当前研究趋势及存在的不足,以期受顶托影响下的河道水流运动特征及其综合治理提供借鉴和参考。

1 受顶托河流的影响因素及其水流运动基本特征

受顶托影响的河道水流运动,与不受顶托的河道水流运动存在显著差异。在众多因素影响下,受顶托作用的河道水流运动特征发生相应变化。本文分别从影响顶托程度的主要因素、受顶托河道水流运动基本特征两个角度,对影响受顶托河流顶托程度的主要因素及其水流运动基本特征进行概述。

1.1 影响顶托程度的主要因素

支流受干流顶托时,不同的主导因素引起支流受顶托程度不一,继而导致受顶托支流水流运动特征发生不同程度变化,基于此领域学者的相关成果,分析影响支流受干流顶托程度的主要因素。大部分学者以汇流比作为影响顶托的主要因素,如许泽星等^[14]、周苏芬等^[15]指出顶托作用随支流汇流比减小而增强,潘增等^[16]认为支流来流量增大可减弱干流洪水的顶托作用,刘志刚等^[17]认为鄱阳湖对其上游五河尾闾顶托的影响取决于湖区水位及湖、河洪水遭遇情况。从入汇角度出发,支流受顶托作用随入汇角度增大而变强;Guillén-Ludeña et al.^[18]认为汇流比和交汇角是山区河流水流运动的主要控制因素。以地形地势作为影响顶托的主要因素,支流河道坡降越大,越不易受干流洪水的顶托^[19]。以距离交汇口远近为

影响顶托的主要因素, 胡国建等^[20]指出顶托作用随着距离下游变远而变弱。可见, 当前大多研究集中于汇流比与顶托间的变化规律, 且随汇流比变小、入汇角度增大、河道比降减小、距离交汇口越近, 支流受顶托程度越强。此外, Chang et al.^[21]分析三峡运行初期洞庭湖顶托对荆江水动力的影响; Lamb et al.^[22]、Chatanantavet et al.^[23]还将回水顶托与近海羽流耦合, 分析三角洲形态的水动力成因; 古俊豪等^[24]综合考虑潮汐, 重新定义了河口回水区长度; Yagci et al.^[25]、Naudascher et al.^[26]分别探索植被、桥梁的顶托效应及其对水流运动特征的影响, 拓展关于研究复杂河流顶托问题的方法和思路。

1.2 受顶托河道水流运动基本特征

受顶托河流在不同因素影响下, 其水流运动特征发生一系列变化, 对其水流运动特征的合理分析是理解干支流顶托现象本质的前提。由于干支流汛期不同步, 对支流而言, 当支流为非汛期而干流为汛期时, 受干流高水位顶托影响, 支流在交汇口处的动水压力小于干流的动水压力, 支流通通过动态调蓄抬升其尾间段水位, 削减干流顶托的影响, 并最终趋于新平衡^[27], 如若干流水位持续上升超过支流上游水位, 则发展为倒灌^[28], 影响作用范围内水生态环境^[29]。期间, 支流受顶托河段水流运动特征发生一系列变化, Liro et al.^[30]认为河流的水深和流速可能受下游顶托的影响, 如水深显著增加, 水位自交汇口向上游溯源壅高, 沿程水面比降减小, 河水淹没范围及过流面积增大, 断面流速、过流能力减小^[31]等。受顶托支流水流运动基本特征见图2。

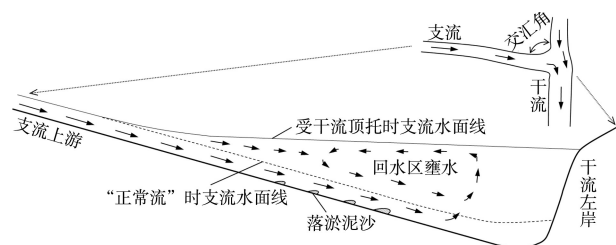


图2 受顶托支流水流运动基本特征

Fig.2 Basic flow movement characteristics of tributaries under backwater

根据上述分析, 关于影响支流受顶托程度的主要因素、受顶托河道水流运动研究已取得一定成果, 总体上可将汇流比作为影响干支流顶托程度的主要因素, 而气候、水利工程运行等自然与人类活动多因素耦合下的水流运动特征还需要进一步研究。

2 受顶托河道水流运动特征对顶托的响应规律研究

受顶托河流水流运动较为复杂, 且水位-流量关系变化显著^[32], 其水流运动特征随各因素变化规律的合理分析, 对受顶托河流防洪与航运建设具有重要指导意义。结合国内外相关理论研究, 本文分别从水位、断面流速、水位-流量关系变化方面, 开展受顶托河道水流运动特征对顶托的响应规律分析。

2.1 水位变化规律研究

在受顶托影响河段的水位变化方面, 袁帅等^[33]指出洞庭湖入汇对长江的顶托导致裁弯后城陵矶水位增高; 柴元方等^[34]认为三峡水库回水顶托抬高了城陵矶水位; 邹红梅等^[35]发现汉口站水位因受鄂东北来水顶托而升高; 周舟等^[36]认为随顶托增强, 交汇口水深变幅越大, 明渠壅水越明显; 唐峰等^[37]发现下游水位低时, 引起回水水位变幅较大; 邬年华等^[38]指出鄱阳湖湖区水位由长江干流控制, 其水位增幅受三峡工程增泄期影响而增大; 章广越等^[39]通过分析三峡水库蓄水对黄石港站水位残差的影响, 认为下游水位顶托增大了洪水位的波动幅度。因此, 在其他河流入汇及工程影响下, 支流水位异常, 受顶托河段随顶托程度增强, 往往水位壅高、水位增幅及波动幅度变大。

2.2 断面流速变化规律研究

针对受顶托河段的断面流速变化方面, 王海周等^[40]在分析不同干支来流对交汇区上游的顶托影响时, 发现支流在二者相互顶托下, 其水流断面流速减小; 刘同宦等^[41]研究不同入汇角下受顶托支流的流速分布特征时, 发现支流以 90° 入汇

后，上游断面时均流速减小；刘晓雁等^[42]通过分析交汇区流速及紊动能分布特征，指出受干流顶托的 Y 形交汇口支流于入汇前出现回流结构。由这些研究成果可知，不同因素影响下，支流在受干流顶托时，在支流入汇处出现回流、其河段断面流速减小，不同顶托程度支流沿程断面流速变化见图 3。

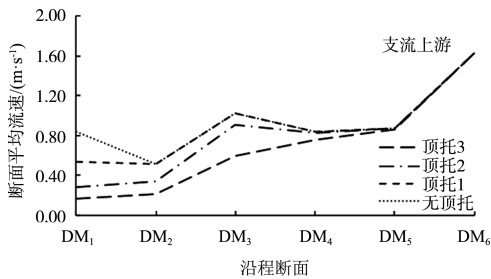


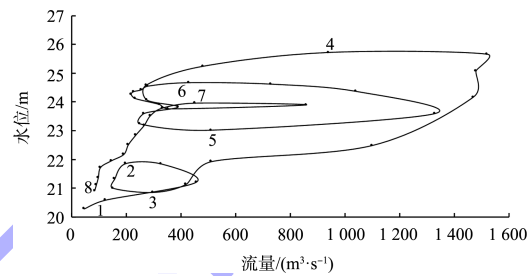
图 3 不同顶托程度支流沿程断面流速变化

Fig. 3 Flow velocity variation of tributary along section under different degrees of backwater

2.3 水位-流量关系研究

在顶托影响下河段的水位-流量关系变化方面，梁秀昉等^[43]通过分析受干流洪水顶托影响的支流断面水位-流量关系，认为干流高水位顶托下，支流水位-流量关系散乱，呈绳套形曲线，典型受顶托河流绳套形水位-流量关系见图 4；戴明龙等^[44]发现长江螺山站水位-流量关系受下游洪水顶托影响，在年内、年际间随洪水而上下摆动；余世民^[45]指出随顶托作用增强，上游水文站泄洪能力减小，其水位-流量关系线受下游湖泊水位影响而上移。为确定受顶托影响下的水位-流量关系，国内外学者从算法、模型等方面入手进行了尝试，Kashani et al.^[46]、华小军等^[47]使用神经网络模拟了受回水影响的水位-流量关系；Petersen-Øverleir et al.^[48]使用基于贝叶斯率定曲线的马尔科夫链蒙特卡罗模拟技术，模拟挪威 Guthusbekken 河的水位-流量关系，但得到的曲线是各因素综合影响下的结果，无法区分是否由顶托造成的水位流量关系变化。孙昭华等^[49]根据回水顶托引起水位变幅的特征，总结河道水位流量关系确定方法可分为单值法与多值法，单值法基于曼宁、

谢才或堰流公式导出^[50]，适用于无回水顶托、无地形调整情况；多值法是在平均线外加辅助水尺，形成以比降为参数的修正因子经验曲线，考虑了涨落率及回水的影响，虽然有一些规范和学者在研究过程中使用，但其所需资料较多、计算过程比较复杂。由此可知，因受通江湖泊高水位和其他河流入汇影响，支流受顶托范围内河段水位流量关系散乱、呈绳套形，水位-流量关系上移。



注：1~8 为曲线随时间变化的走向。

图 4 受顶托河流绳套形水位-流量关系

Fig. 4 Lasso-shaped relationship between water level and flow rate in rivers affected by backwater

支流在干流顶托影响下，水流下泄受阻，一方面支流水位不断壅高，断面流速减小；另一方面河段内水位-流量关系散乱，大致呈上移趋势。受顶托不明显河段的水位、流量参数相关程度较高，确定水位-流量关系较为简便，但受顶托明显河段复杂水位流量关系难以用简单曲线高度拟合，尤其在季节干支来水遭遇情况时，描述可代表河道全时段水流运动规律的水位-流量关系的方法还有待进一步研究。

3 河道水流受顶托程度表征方法

顶托程度的合理表征是制约交汇河流防洪与建设的难题之一，对流域综合治理具有重要意义。国内对于干支流顶托程度的表征研究较早，学者们从水位壅高、支流流量变化、依据守恒原理构造顶托强度指标等角度入手，开展了相关工作。

支流受顶托后的水位变化，可简单、直观表

示支流受顶托程度。尚海鑫等^[51]以实际水位相较于无顶托时水位的壅高值 ΔZ 表征顶托强弱; 杨春瑞等^[52]将水位差之比 $\Delta Z_0/\Delta Z_s$ 定义为顶托强度指数, 其中 ΔZ_0 、 ΔZ_s 分别为实际、无顶托水位差, 分析三峡水库运行前后, 洞庭湖、鄱阳湖出流对长江顶托程度的变化情况; 张明月等^[53]以水位变化构造顶托响应指数 $J_z = \Delta_{zn}/\Delta_d$ 量化顶托强度, 其中 Δ_d 为下游水位变化值, Δ_{zn} 为下游水位顶托引起的上游水位变化, 开展鄱阳湖出流对长江汉口洪水位顶托影响的量化分析。

支流受顶托后下泄流量减小, 根据支流流量变化也可表征其受顶托程度。以滞留河道水量 $Q_i - q_i$ 与无顶托出流量 q_i 的比值构造顶托消落比 $\alpha = (Q_i - q_i)/q_i$ 表征江湖顶托作用, 陈栋等^[54]分析洞庭湖与下荆江相互顶托、消落作用随来流量、城陵矶水位及汇流比的变化规律; 胡振鹏等^[55]分析长江来水对鄱阳湖顶托的影响; 郝建平等^[56]以调蓄后湖口出流量与实测湖口出流量差异构造洪水顶托强度指数 $J = |\Delta_2| / (|\Delta_1| + |\Delta_2|)$ 描述顶托强度, 其中 Δ_i 为湖区湖口调蓄后的出流量与实测出流量之差, $\Delta_1 > 0$ 代表“湖补江”作用, $\Delta_2 < 0$ 代表湖分洪作用, 研究不同时期来水差异、三峡调度、湖区容积变化对江湖顶托强度的影响。

从守恒原理的角度来看, 顶托是干、支流能量差异的直观表现。邓金运等^[57]以湖口流量 Q 与湖口水位 z 构造能差 $F_e = f_1 \cdot \frac{Q}{z} + f_2 z^{1/2} + f_3$ 表征江湖相互顶托作用, 其中 f_1 、 f_2 、 f_3 分别为经验系数与修正值, 认为三峡水库蓄水削弱了长江的顶托作用; 李雨等^[58]以长江水能与鄱阳湖水能之差 $W_{湖口} = W_{江} - W_{湖}$, 寻求倒灌发生的临界条件, 分析三峡水库建成后长江与鄱阳湖相互作用关系的变化情况, 揭示鄱阳湖具有“洪水湖相、枯水河相”特性, 并认为长江水位高于鄱阳湖水位是倒灌发生的前提条件。

基于水流运动特征参数变化, 从水位壅高、流量变化、能量守恒等角度出发, 针对江、湖间

顶托强度的表征取得一定成果。但针对受顶托河流顶托强度的描述, 目前尚无明确统一的标准, 若以水位或流量等单一参数变化描述, 则易出现表征失灵的情况, 例如: 水位变化相同, 但河道越窄受顶托影响越大, 沿程河道宽与窄两种情况受顶托程度明显不同。如何全面考虑各水流运动参数变化情况, 提出可描述支流受顶托程度的综合表征方法, 确定发生顶托的临界水动力条件, 是后续研究工作的一项重点。

4 结语

1) 从当前国内外研究现状及趋势来看, 围绕受顶托河流, 探究影响其水流运动的主要因素、分析其水流运动特征对各因素的响应规律、提出其受顶托程度的表征方法, 已取得一定进展, 但随着水沙条件变化和人类活动的持续影响, 受顶托作用的河道水流运动更加复杂。

2) 后续可从以下 3 个方面继续深入研究:
 ①多因素耦合作用下受顶托河道水流运动特征研究。在已有单影响因素分析的基础上, 考虑气候变化、大型水利工程调度运行及人类活动等多因素耦合, 进行受顶托河道水流运动分析, 探究各因素对水流运动特征变化的贡献大小, 揭示多因素耦合作用下受顶托河道水流运动规律, 为河流综合治理和航运规划提供科学依据。
 ②受顶托河流复杂水位-流量关系描述方法研究。对受顶托明显河流而言, 其水位流量关系散乱, 难以用单一曲线高度拟合其水位-流量关系, 在符合其水流运动规律的前提下, 提出其复杂水位-流量关系的简易描述方法, 为受顶托河流相关研究提供重要方法。
 ③河道水流受顶托程度综合表征方法研究。依据河流动力学基本理论, 全面考虑水位、流速、流量等水流参数变化, 提出并优化河流受顶托程度的综合表征方法, 在此基础上分析发生顶托作用的阈值条件, 可为受顶托河流的防洪安全与航道开发提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 芮孝芳,姜广斌.洪水演算理论与计算方法的若干进展与评论[J].水科学进展,1998(4):78-84.
RUI X F,JIANG G B. Developments and reviews on theories and computational methods of flood routing[J]. Advances in water science,1998 (4):78-84.
- [2] VAN YPEREN A E,HOLBROOK J M,POYATOSMORÉ 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.
- [3] 赵双.嫩江与第二松花江洪水相互顶托对河道水位的影响规律研究[D].大连:大连理工大学,2018.
ZHAO S. Study on the law of backwater effect on river water level between Nenjiang River and the second Songhua River [D]. Dalian : Dalian University of Technology,2018.
- [4] IKEUCHI H,HIRABAYASHI Y,YAMAZAKI D, et al. Modeling complex flow dynamics of fluvial floods exacerbated by sea level rise in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta[J]. Environmental research letters,2015,10(12):124011.
- [5] TRIGG M A,WILSON M D,BATES P D, et al. Amazon flood wave hydraulics[J]. Journal of hydrology,2009,374(1/2):92-105.
- [6] 易丽.历史时期长江中游江湖关系的演变:以洞庭湖、鄱阳湖为例[D].武汉:武汉大学,2017.
YI L. The evolution of river-lake relationship's in the middle region of Yangtze River during historicalperiod: take Dongting Lake and Poyang Lake as examples [D]. Wuhan: Wuhan University,2017.
- [7] 张涛.非对称型河流交汇区水流结构与污染物输运规律研究[D].西安:西安理工大学,2021.
ZHANG T. Study on flow structure and pollutant transport at the asymmetric river confluences [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2021.
- [8] 孙亚楠.嫩江、第二松花江洪水遭遇及顶托影响研究[D].大连:大连理工大学,2019.
SUN Y N. Study on flood coincidence and backwater effect in Nen River and the second Songhua River[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2019.
- [9] 付旭辉,龚明正,杨胜发,等.三峡变动回水区末端段成库前后水位特征分析[C]//中国水利学会.中国水利学会2016学术年会论文集(上册).南京:河海大学出版社,2016:339-345.
FU X H,GONG M Z,YANG S F, et al. Study water level characteristics before and after impoundment in terminal of fluctuating backwater region of Three Gorges Reservoir[C]// Chinese Hydraulic Engineering Society. 2016 CHES Annual Conference (vol. 1). Nanjing: Hohai University Press,2016:339-345.
- [10] 胡旭跃,黄伦超,沈小雄,等.入湖河流尾闾段的河性及航道整治[J].长沙交通学院学报,2002(1):49-55.
HU X Y,HUANG L C,SHEN XX, et al. The characteristics of the tail of river and channel regulation[J]. Journal of Changsha Communications University,2002(1):49-55.
- [11] 杨云平,周良平,张华庆,等.三峡工程运行后荆江河段分汇段航道水深资源及碍航驱动机制[J].湖泊科学,2023,35(2):684-695.
YANG Y P,ZHOU L P,ZHANG H Q, et al. Water depth resources and driving mechanism of navigation hindrance of Jingjiang Reach watershed after Three Gorges Project operation [J]. Journal of lake sciences,2023,35(2):684-695.
- [12] 假冬冬,邵学军,周刚.弯曲河道横向摆动过程数值模拟研究进展[J].水利水电科技进展,2007(4):90-95.
JIA DD,SHAO X J,ZHOU G. Advances in numerical simulation of lateral migration of meandering channels[J]. Advances in science and technology of water resources,2007(4):90-95.
- [13] 季益柱,丁全林,王玲玲,等.三峡水库一维水动力数值模拟及可视化研究[J].水利水电技术,2012,43(11):21-24.
JI Y Z,DING Q L,WANG LL, et al. 1-D hydrodynamic numerical simulation of Three Gorges Reservoir and its visualization study [J]. Water resources and hydropower engineering,2012,43(11):21-24.
- [14] 许泽星,郑媛予,关见朝,等.岷江都江堰河段交汇区水流运动特性数值模拟[J].工程科学与技术,2019,51(3):59-66.
XU Z X,ZHENG Y Y,GUAN J C, et al. Numerical simulation of flow dynamic characteristics at confluence region of Minjiang River in the Dujiangyan Reach [J]. Advanced engineering sciences,2019,51(3):59-66.
- [15] 周苏芬,叶龙,刘兴年,等.嘉陵江与长江交汇水流顶托效应特性研究[J].四川大学学报(工程科学版),2014,46(S1):7-11.

- ZHOU S F, YE L, LIU X N, et al. Study on the backwater effect on flow characteristics at confluence zone between Jialing River and Yangtze River [J]. *Journal of Sichuan University (engineering science edition)*, 2014, 46(S1): 7-11.
- [16] 潘增, 毕明亮, 陈忠贤, 等. 岷江—横江洪水顶托对向家坝水电站通航影响研究 [J]. *水运工程*, 2023(12): 137-144.
- PAN Z, BI M L, CHEN Z X, et al. Navigation impact of Minjiang and Hengjiang flood jacking on Xiangjiaba Hydropower Station [J]. *Port & waterway engineering*, 2023(12): 137-144.
- [17] 刘志刚, 倪兆奎. 鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1265-1273.
- LIU Z G, NI Z K. The rules and the effects of varying river-lake relationships on the evolution of Poyang Lake [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2015, 35(5): 1265-1273.
- [18] GUILLÉN-LUDEÑA S, FRANCA M J, CARDOSO A H, et al. Evolution of the hydromorphodynamics of mountain river confluences for varying discharge ratios and junction angles [J]. *Geomorphology*, 2016, 255(2): 1-15.
- [19] 段士可, 诸裕良, 冯艳. 松花江洪水对嫩江顶托特性的数值模拟研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(23): 292-297.
- DUAN S K, ZHU Y L, FENG Y. Numerical simulation study on the backwater effects of Songhua River flood to Nen River [J]. *Science technology and engineering*, 2017, 17(23): 292-297.
- [20] 胡国建, 丁涛, 尤爱菊, 等. 钱塘江洪水顶托对浦阳江洪水位的影响研究 [J]. *水电能源科学*, 2011, 29(11): 11-14.
- HU G J, DING T, YOU A J, et al. Influence of Qiantangjiang Estuary flood backwater on flood level of Puyang River [J]. *Water resources and power*, 2011, 29(11): 11-14.
- [21] CHANG J, LI J B, LU D Q, et al. The hydrological effect between Jingjiang River and Dongting Lake during the initial period of Three Gorges Project operation [J]. *Journal of geographical sciences*, 2010, 20(5): 771-786.
- [22] LAMB M P, NITTROUER J A, MOHRIG D, et al. Backwater and river plume controls on scour upstream of river mouths: implications for fluvio-deltaic morphodynamics [J]. *Journal of geophysical research*, 2012, 117: F01002.
- [23] CHATANANTAVET P, LAMB M P, NITTROUER J A. Backwater controls of avulsion location on deltas [J]. *Geophysical research letters*, 2012, 39(1): L01402.
- [24] 古俊豪, 蔡华阳, 杨昊, 等. 河口回水动力的演变过程及其影响机制: 以长江河口为例 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(12): 31-41.
- GU J H, CAI H Y, YANG H, et al. The evolution of estuarine backwater dynamics and its underlying mechanism: a case study of the Changjiang River Estuary [J]. *Acta oceanologica sinica*, 2022, 44(12): 31-41.
- [25] YAGCI O, STROM K. Reach-scale experiments on deposition process in vegetated channel: suspended sediment capturing ability and backwater effect of instream plants [J]. *Journal of hydrology*, 2022, 608: 127612.
- [26] NAUDASCHER E, MEDLARZ H J. Hydrodynamic loading and backwater effect of partially submerged bridges [J]. *Journal of hydraulic research*, 1983, 21(3): 213-232.
- [27] 邓金运, 范少英, 庞灿楠, 等. 三峡水库蓄水期长江中游湖泊调蓄能力变化 [J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(5): 147-152.
- DENG J Y, FAN S Y, PANG C N, et al. Adjustment of regulation and storage capacity of lakes in the middle Yangtze River Basin during impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5): 147-152.
- [28] 王志寰, 朱立俊, 王建中, 等. 长江倒灌鄱阳湖原因及发生条件的量化指标 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 203-213.
- WANG Z H, ZHU L J, WANG J Z, et al. Reverse flow from Yangtze River to Poyang Lake: causes and occurrence conditions quantization index [J]. *Advances in water science*, 2020, 31(2): 203-213.
- [29] ARUNPANDI N, JYOTHIBABU R, JAGADEESAN L, et al. Impact of a large hydraulic barrage on the trace metals concentration in mesozooplankton in the Kochi backwaters, along the Southwest coast of India [J]. *Marine pollution bulletin*, 2020, 160(2): 111568.
- [30] LIRO M, NONES M, MIKÚŠ P, et al. Modelling the

- effects of dam reservoir backwater fluctuations on the hydrodynamics of a small mountain stream[J]. *Water*, 2022, 14(19): 3166.
- [31] 林芬芬, 夏军强, 周美蓉, 等. 下荆江河槽形态及过流能力调整对上下游边界条件的响应[J]. *水利学报*, 2019, 50(5): 641-649.
LIN F F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Recent response of bankfull channel geometry and flood-discharge capacity in the lower Jingjiang Reach to upstream and downstream boundary conditions [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2019, 50(5): 641-649.
- [32] 周刚, 郑丙辉, 雷坤, 等. 赣江下游水动力数值模拟研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 102-108.
ZHOU G, ZHENG B H, LEI K, et al. Numerical simulation of hydrodynamics for the lower Ganjiang River[J]. *Journal of hydroelectric engineering*, 2012, 31(6): 102-108.
- [33] 袁帅, 李志威, 朱玲玲. 七弓岭弯道颈口裁弯条件及其对城陵矶水位影响[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(2): 89-100.
YUAN S, LI Z W, ZHU L L. Threshold for neck cutoff occurrence in Qigongling bend and its influence on Chenglingji stage of lower Jingjiang River[J]. *Journal of hydroelectric engineering*, 2019, 38(2): 89-100.
- [34] 柴元方, 李义天, 李思璇, 等. 不同因素对城陵矶水位变化贡献率的分析[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(8): 60-64.
CHAI Y F, LI Y T, LI S X, et al. Analysis of variation characteristics of water level at Chenglingji and its contribution of influencing factors [J]. *Water resources and power*, 2017, 35(8): 60-64.
- [35] 邹红梅, 李世强, 陈瑜彬. 长江汉口水位受鄂东北及汉江来水影响分析[J]. *人民长江*, 2011, 42(6): 83-86.
ZOU H M, LI S Q, CHEN Y B. Analysis of influence on water level of Hankou Station by incoming water of Hanjiang River and the tributaries in northeastern Hubei Province[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(6): 83-86.
- [36] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(4): 347-353.
ZHOU Z, ZENG C, ZHOU J, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences [J]. *Journal of Hohai University (natural sciences)*, 2020, 48(4): 347-353.
- [37] 唐峰, 李发政, 渠庚, 等. 长江城陵矶汇流河段水流运动特性试验研究[J]. *人民长江*, 2011, 42(7): 43-46.
TANG F, LI F Z, QU G, et al. Experimental study on flow features of Chenglingji confluence reach of Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2011, 42(7): 43-46.
- [38] 邬年华, 罗优, 刘同宦, 等. 三峡工程运行对鄱阳湖水位影响试验[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 522-528.
WU N H, LUO Y, LIU T H, et al. Experimental study on the effect of the Three Gorges Project on water level in Lake Poyang[J]. *Journal of lake sciences*, 2014, 26(4): 522-528.
- [39] 章广越, 谈广鸣, 张为, 等. 三峡水库运行后汉口—九江河段水位变化特征及成因[J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 85-97.
ZHANG G Y, TAN G M, ZHANG W, et al. Characteristics and causes of the water level variations following the operation of the Three Gorges Dam with special reference to the Hankou-Jiujiang reach of the middle Yangtze River [J]. *Advances in water science*, 2024, 35(1): 85-97.
- [40] 王海周, 王冰洁, 刘兴年, 等. 明渠交汇区水位变化特性试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(S1): 13-17.
WANG H Z, WANG B J, LIU X N, et al. Experimental study on water-level fluctuation characteristics at open channel confluence zone [J]. *Journal of Sichuan University(engineering science edition)*, 2015, 47(S1): 13-17.
- [41] 刘同宦, 郭炜, 詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 485-489.
LIU T H, GUO W, ZHAN L. Experimental study of the velocity profile at 90° open channel confluence [J]. *Advances in water science*, 2009, 20(4): 485-489.
- [42] 刘晓雁, 王凯, 谌霞, 等. 湟水与黄河交汇区水力特性数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2024(2): 62-71.
LIU X Y, WANG K, CHEN X, et al. Hydrodynamic properties observed at the junction of the Huangshui River and the Yellow River [J]. *Hydro-science and engineering*, 2024(2): 62-71.
- [43] 梁秀昉, 邱天尧. 干流水位顶托影响下的支流水位~流量关系探索[J]. *东北水利水电*, 2023, 41(10): 21-22, 43.

- LIANG X F, QIU T Y. Study on relationship between water level and discharge in tributaries under influence of main stream water level jacking[J]. *Water resources & hydropower of Northeast China*, 2023, 41 (10): 21-22, 43.
- [44] 戴明龙, 王立海, 李立平, 等. 2020年长江螺山站水位流量关系分析[J]. *人民长江*, 2022, 53(5): 118-122, 142.
- DAI M L, WANG L H, LI L P, et al. Analysis on relationship between water level and flow at Luoshan Station in Changjiang River in 2020[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(5): 118-122, 142.
- [45] 余世民. 宿松水文站受湖泊顶托影响分析[J]. *水利科学与寒区工程*, 2023, 6(4): 86-88.
- YU S M. Analysis on influence by lake top support in Susong Hydrology Station[J]. *Hydro science and cold zone engineering*, 2023, 6(4): 86-88.
- [46] KASHANI M H, DANESHFARAZ R, GHORBANI M A, et al. Comparison of different methods for developing a stage-discharge curve of the Kizilirmak River[J]. *Journal of flood risk management*, 2015, 8(1): 71-86.
- [47] 华小军, 汪芸, 刘志武. 多河流顶托情况下水库下游水位计算方法探讨[J]. *人民长江*, 2016, 47(7): 34-36.
- HUA X J, WANG Y, LIU Z W. Study on calculation of water level at downstream of reservoir under influence of backwatering effects of multi-rivers[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(7): 34-36.
- [48] PETERSEN-ØVERLEIR A, REITAN T. Bayesian analysis of stage-fall-discharge models for gauging stations affected by variable backwater[J]. *Hydrological processes*, 2009, 23(21): 3057-3074.
- [49] 孙昭华, 周歆玥, 范杰玮, 等. 考虑回水影响的河道水位-流量关系确定方法[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 259-270.
- SUN Z H, ZHOU X Y, FAN J W, et al. Stage-discharge rating method considering backwater effect in river channel[J]. *Advances in water science*, 2021, 32(2): 259-270.
- [50] JURACEK K E, FITZPATRICK F A. Geomorphic applications of stream-gage information [J]. *River research and applications*, 2009, 25(3): 329-347.
- [51] 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 H X, HU C H, XIA J Q, 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.
- [52] 杨春瑞, 邓金运, 陈立, 等. 长江中游通江湖泊对干流顶托作用变化规律[J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 98-111.
- YANG C R, DENG J Y, CHEN L, et al. Study on the change of backwater effect of the connected lakes in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Advances in water science*, 2024, 35(1): 98-111.
- [53] 张明月, 邓鹏鑫, 王磊之, 等. 鄱阳湖汇流顶托对长江汉口水位影响的量化分析[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(5): 1712-1722.
- ZHANG M Y, DENG P X, WANG L Z, et al. Quantitative analysis of influence of converge jacking in Lake Poyang on the water level in Hankou Section of Yangtze River[J]. *Journal of lake sciences*, 2022, 34(5): 1712-1722.
- [54] 陈栋, 渠庚, 郭小虎, 等. 三峡建库前后洞庭湖对下荆江的顶托与消落作用研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 86-94.
- CHEN D, QU G, GUO X H, et al. Study of the supporting and falling impact of Dongting Lake on the Lower Jingjiang River before and after construction of Three Gorges Dam[J]. *Advanced engineering sciences*, 2020, 52(2): 86-94.
- [55] 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 Z P, FU J. 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.
- [56] 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 J P, DENG P X, LYU S Y, 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.