

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.014

密度差对长江与鄱阳湖交汇处掺混动力过程影响的数值模拟研究

凌宇翔^{1,2}, 张汇明^{1,2,3}, 方雨旻⁴, 王昊^{1,2}, 林昊⁵, 陆丹蓉^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 水利部水循环与水动力系统重点实验室;
4. 河海大学环境学院; 5. 长江水利委员会长江科学院河流研究所)

摘要: 为研究温差驱动的密度流对长江与鄱阳湖交汇处水流结构与掺混特征的影响, 基于现场监测数据, 构建了长江与鄱阳湖交汇处三维水动力数值模型, 对不同密度差条件下交汇处的水动力与掺混过程进行了模拟分析。结果表明: 长江与鄱阳湖交汇处的剪切层向密度较高的一侧倾斜, 两汉水流密度差越大, 剪切层倾斜越明显; 长江水体密度小于鄱阳湖时, 交汇处形成一股顺时针单螺旋结构二次流, 反之则形成一对反向旋转的双螺旋结构二次流; 密度差效应增强了低密度水体在水面附近对高密度水体的侵入作用, 当长江水体密度高于鄱阳湖时, 对掺混产生促进作用, 反之则抑制掺混。

关键词: 河流交汇; 密度差; 掺混; 二次流; 长江; 鄱阳湖

Numerical simulation study on effect of density difference on mixing dynamic process at confluence of the Yangtze River and Poyang Lake

Ling Yuxiang^{1,2}, Zhang Huiming^{1,2,3}, Fang Yuyang⁴, Wang Hao^{1,2}, Lin Hao⁵, Lu Danrong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;

3. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources;

4. College of Environment, Hohai University;

5. River Research Department, Yangtze River Scientific Research Institute)

Abstract: To study the effect of the density current driven by temperature difference on the flow structure and mixing characteristics at the confluence of the Yangtze River and Poyang Lake, a three-dimensional hydrodynamic numerical model of the confluence channel of the Yangtze River and Poyang Lake was constructed based on field monitoring data, and the hydrodynamics and mixing processes at the confluence under conditions of different density differences were simulated and analyzed. The results indicate that the shear layer at the confluence of the Yangtze River and Poyang Lake tilts toward the side with a higher density, and a larger density difference between the two branch flows indicates a more obvious tilt of the shear layer; when the density of the Yangtze River water body is lower than that of Poyang Lake, a clockwise single-helix secondary flow is formed at the confluence, and conversely, a pair of counter-rotating double-helix secondary flows are formed; the density difference effect enhances the intrusion effect of the low-density water body into the high-density water body near the water surface, and when the density of the Yangtze River water body is higher than that of Poyang Lake, it has a promoting effect on mixing, and conversely, it suppresses mixing.

Key words: river confluence; density difference; mixing; secondary flow; the Yangtze River; Poyang Lake

在天然河流系统中, 交汇河道连接主流与支流, 是河网的基本组成部分^[1], 也是流域中水沙运动与水生态环境变化的重要控制节点^[2-3]。两条具有不同水温、含沙量和有机质含量的水流在交汇处发生掺混, 其过程显著影响河流系统的物质输移、河床演变与水生生物栖息地^[3-4], 尤其是宽深比较大(>50^[2])的大型交汇河道, 水沙、污染物在河道及下游的掺混距离可达数百千米^[5], 对下游河道地形演变、水生态环境有重大影响^[3]。因此研究河流交汇处复杂的水流掺混过程具有重要意义。

交汇处的掺混过程通常取决于分子扩散、剪切驱动的湍流扩散^[6]和大尺度连续流动(通常为螺旋状)驱

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202602); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52309089)

作者简介: 凌宇翔(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: 1050261347@qq.com

通信作者: 张汇明(1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事河网数值模拟与物质输移规律研究。E-mail: hzmzhang@hhu.edu.cn

动的对流扩散^[7-9]的综合效应^[10],国内外学者通过现场观测^[11-15]、物理模型试验^[16-17]和数值模拟^[18-22]等研究方法,对平面几何形状、交汇角、汇流比、流速比、动量通量比、密度差和河床高程差等影响交汇处水流结构与掺混过程的主要因素开展了研究。近年来,由于温度、含沙量以及盐度不同产生的支流和主流的密度差对交汇处水动力学与掺混的影响受到越来越多的关注^[23-27],如 Xu 等^[13]的研究表明,密度差产生的闸下异重流机制可能与交汇处水流弯曲诱导的螺旋流结构协同作用,根据密度梯度方向的不同对掺混速率产生不同的影响;Ramón 等^[28-29]研究发现密度差较小会倾斜掺混界面,增加水体接触面积从而促进交汇处的掺混,而密度差特别大时,水流之间会产生稳定的分层现象,阻碍掺混的发生,降低掺混程度。

我国最大的河流和最大的淡水湖长江与鄱阳湖交汇为典型的大宽深比(宽深比为 200)交汇,叠加江湖来流的温度和悬沙浓度差异引起的密度差作用,使该处水动力过程和物质掺混极其复杂。Yuan 等^[2,13-14]在长江与鄱阳湖交汇处发现了不同模式的二次流结构,揭示了不同动量通量比、宽深比和二次流规模下的掺混模式。但目前对密度差的影响过程和影响机制仍不完全清楚,本文基于 Delft3D 建立长江与鄱阳湖交汇处三维水动力数值模型,分析揭示密度差对大型交汇河道物质掺混规律的影响,以期为江湖系统水沙动力变化及水生态环境演变的研究提供参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

长江与鄱阳湖交汇河道位于三峡大坝下游约 900 km、长江口上游约 800 km 处。如图 1(a)所示,长江在江西省九江段流经张家洲时河道分叉,在九江站下游约 19 km 处交汇,交汇角接近 90°,右汊称为南港,左汊称为北港,南港分流比约为 60%,右汊南港水流进一步被官洲分流后汇合,再与鄱阳湖的出湖水流由通江水道在湖口县附近交汇,其顶点位于梅家洲。为适应河道形态变化,长江河道在交汇处发生弯曲偏折进入下游。

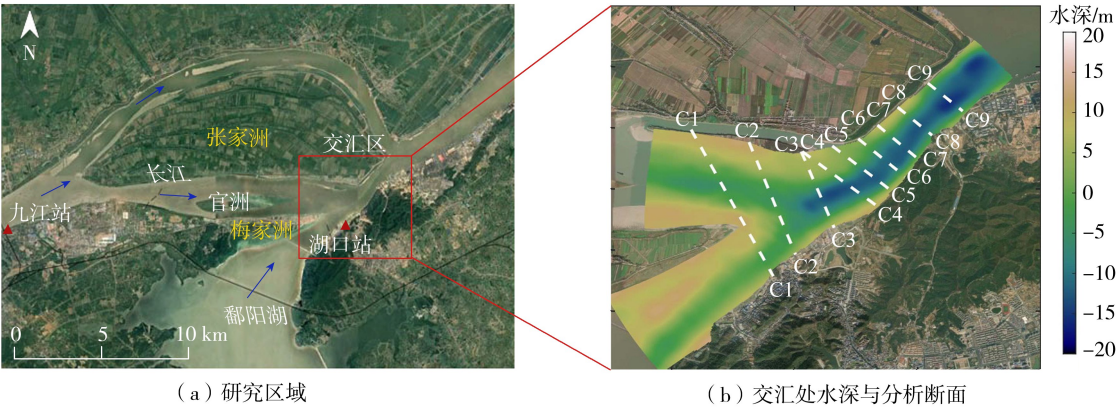


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of study area

如图 1(b)所示,官洲下游长江右岸处有明显的滩地存在,且滩地宽度逐渐缩窄,但至交汇顶点处,长江右侧滩地已基本消失。在交汇顶点处观察到停滞区沙垄的存在,同时在交汇下游内侧河道转向处发现了与岸边相连的贴岸沙垄,贴岸沙垄的下游均可以观察到明显的冲深坑存在。停滞区沙垄下游交汇河道的床面形态为一段延伸的深槽。本文基于 Yuan 等^[2,13-14] 10 次现场观测的结果,整理了长江与鄱阳湖的水温资料(表 1)。鄱阳湖由于面积大、水深浅,入江水道和长江在冬季与夏季存在 1.5~3℃的温差,造成密度差高达 0.9 kg/m³,显著改变了交汇处水动力特性与污染物的时空分布,进而影响下游生态环境系统。

表 1 不同时间长江和鄱阳湖入流的水温与密度差

时间	水温/℃		温差/℃	密度差/(kg/m ³)
	长江	鄱阳湖		
2018-08	28.0	29.2	-1.2	0.4
2018-12	10.8	8.3	2.5	-0.3
2019-03	14.2	14.9	-0.7	0.1
2020-08	28.3	30.6	-2.3	0.9
2020-12	11.5	8.6	2.9	-0.2
2021-04	16.7	18.0	-1.3	0.4
2021-06	22.3	24.9	-2.6	0.8
2021-10	19.3	17.0	2.3	-0.4
2022-10	21.9	19.3	2.6	-0.6
2023-04	18.1	20.1	-2.0	0.4

长江与鄱阳湖交汇河道是一个大型非对称等高河床交汇河道,宽深比超过 100,汇流角约 58°(由深泓线交角确定)。为方便表述,下文所称长江均指张家洲右侧的支流。无名岛与张家洲之间的支流流量很小,仅占河道流量的不到 5%,预计对二次流模式与掺混特性的影响可以忽略不计,因此,本文没有考虑到这些支流的汇入。

1.2 研究数据

采用 2020 年 8 月至 2021 年 6 月 4 次现场测量数据^[15]进行模型的构建和验证,包括地形、水位、流速和水温数据。在交汇前长江河段设置 4 个断面,官洲左侧和右侧各设置 1 个断面(I-L 和 I-R),官洲下游设置 2 个断面(Y1 和 Y2);交汇前鄱阳湖河道设置 3 个断面(P1~P3),交汇后河段共设置 10 个断面(CYP0~CYP9)。交汇下游共布设了 15 个采样点,每个断面设置 3 个采样点,分别位于长江一侧、掺混层和鄱阳湖一侧。

2 数值模型

数值模型采用在河流、湖泊、水库模拟中得到广泛应用并适用于交汇处模拟^[26,30]的 Delft3D-Flow 构建。考虑长江与鄱阳湖交汇处较大的宽深比,水平运动尺度远大于垂向运动尺度,采用浅水近似方法进行模拟。

2.1 模型建立

模型基于水体静力假设和 Boussinesq 近似(假设仅在动量方程的压力项中考虑密度变化的影响)求解不可压缩水体的雷诺平均纳维-斯托克斯方程(N-S 方程)。采用水平大涡模拟(HLES)和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型表征湍流的影响,其中物质掺混过程通过求解密度场和被动标量浓度的对流-扩散方程来描述,采用 UNESCO 方程计算水体密度。模型在平面上采用贴体曲面四边形网格,可以较好地拟合复杂岸线,模型控制方程包括连续性方程、动量方程、对流扩散方程和状态方程。

a. 水深平均连续性方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = Q \tag{1}$$

式中: t 为时间; x 、 y 为正交曲线结构网格中的水平坐标; σ 为垂直方向上坐标; ζ 为水面高程; h 为水深; u 、 v 为 xOy 坐标系中的水深平均流速; w 为垂向流速; Q 为源项; σ 为垂直方向坐标的变化率。

b. x 和 y 方向的动量方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = - \left[g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{h}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma \right] + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_h \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - fu = - \left[g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{h}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \sigma}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma \right] + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \tag{3}$$

式中: f 为柯氏力; ρ 为水体的密度; ρ_0 为水体的参考密度; F_x 、 F_y 为水平雷诺应力; M_x 、 M_y 为动量的源汇项; ν_h 、 ν_v 分别为水平和垂直湍流黏度; g 为重力加速度。

c. 水温运输的对流扩散方程为:

$$\frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(UT)}{\partial x} + \frac{\partial(VT)}{\partial y} + \frac{\partial(WT)}{\partial \sigma} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + hQ \tag{4}$$

式中: T 为水温; D_h 、 D_v 分别为水平和垂直湍流扩散系数。

d. 密度 ρ 与水温 T 的状态方程如下:

$$\rho = 999.99 + 1.91 \times 10^{-2} T - 5.9 \times 10^{-3} T^2 + 2.0 \times 10^{-5} T^3 \tag{5}$$

如图 1(b) 所示,模拟使用的水深与 Xu 等^[13]2020 年 8 月现场测量的水深相同。Xu 等^[13]现场观测是在汛期进行的,此时鄱阳湖入江水道呈现湖泊形态,滩地处于淹没状态,研究区域网格分辨率为 4~20 m,由于研究区域地处平原,坡度较缓,垂直方向采用 σ 坐标,该坐标可以对地形进行准确拟合。为保证有足够的分辨率解析垂向流动,本文在垂向共设置 20 层,在自由表面与底部进行加密,中间层进行线性过渡,在交汇处与河道较深处进行加密。时间步长受 CFL 条件限制,同时考虑精度与计算成本,时间步长设置为 0.01 min。数值离散采用 ADI 交替隐式差分方法,

曼宁系数设为 0.02,用于计算床面剪切应力。由于研究区域流速较大(约为 2 m/s),不考虑风与热交换对水动力场与温度的影响^[24]。此外,长江和鄱阳湖由于沉积物浓度与盐度差产生的密度差较小,因此本文

“密度差”主要指因主流与支流温度差产生的密度差。

数值模型包含 3 个开边界:①长江上游开边界位于交汇处上游 2 km,由流量和水温确定;②鄱阳湖上游开边界位于交汇上游 3 km 处,由流量和温度确定;③交汇下游开边界距离长江与鄱阳湖交汇处 10 km,由水位和温度确定。上述流量、水位、水温均来源于 Xu 等^[13]的现场观测资料。

根据现场测量的 CYP1 断面的水位、P2 与 CYP4 断面的水深平均流速对水动力模型进行验证,采用平均绝对误差 (MAE) 和平均相对误差 (MRE) 作为评估指标。验证结果如表 2 与图 2 所示,模型与实测值具有较好的一致性。

表 2 CYP1 断面日水位模拟误差分析
Table 2 Error analysis of daily water level simulation at CYP1 cross-section

测量时间	实测平均水位/m	模拟平均水位/m	MAE/m	MRE/%
高水位时期	18.94	18.76	0.18	0.950
中水位时期	12.52	12.40	0.12	0.958
低水位时期	9.09	9.01	0.08	0.880

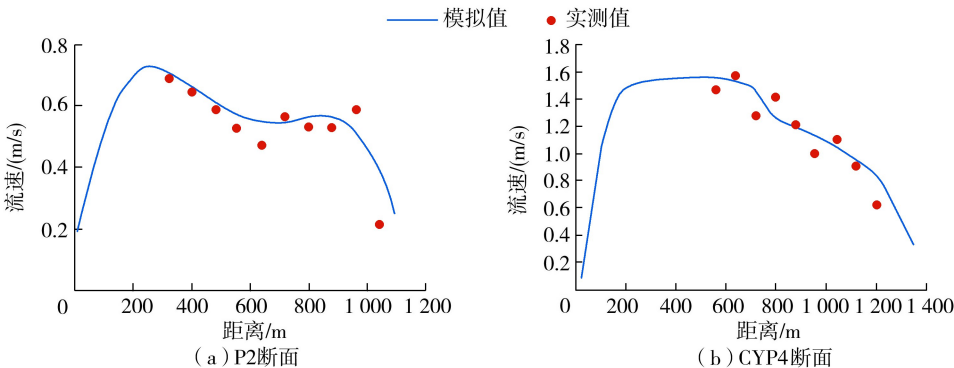


图 2 数值模型与现场观测的断面水深平均流速对比

Fig. 2 Comparison of cross-sectional depth-averaged velocity between numerical model and field observation

2.2 工况设置

模拟工况设置如表 3 所示,在 2020 年 8 月 23 日的水动力条件下,各工况下的流量和水位都是恒定的,但密度差 $\Delta\rho$ 的方向和大小不同,本文将长江设为主流,鄱阳湖设为支流,模型中长江主流流量 Q_m 设为 $24\,573\text{ m}^3/\text{s}$,鄱阳湖支流流量 Q_l 设为 $9\,028\text{ m}^3/\text{s}$,汇流比为 0.37,动量通量比为 0.17。为了反映密度差的影响,本文采用密度弗劳德数 Fr_d 来表征密度效应的强弱,定义为 $Fr_d = v_a / \sqrt{\Delta\rho / \rho_c g h_a}$,其中 v_a 、 h_a 分别为交汇后的平均流速与平均水深, ρ_c 为主流密度。本文 Fr_d 范围为 2.13~5.38,根据 Horna-Munoz 等^[31]的研究,该范围包含了密度效应较强 ($2 < Fr_d < 4$) 的情况与密度效应较弱 ($Fr_d > 5$) 的情况。此外,本文采用恒定的示踪剂质量浓度追踪支流水体,其中鄱阳湖侧和长江侧的示踪剂质量浓度分别设置为 1、0 g/L。

表 3 模拟工况参数设置
Table 3 Parameter settings of simulation cases

工况编号	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$(\Delta\rho/\rho_0)/10^{-4}$	Fr_d
1	-3.0	0.89	8.90	2.13
2	-1.0	0.28	2.80	3.80
3	-0.5	0.14	1.40	5.38
4	0	0	0	∞
5	0.5	-0.14	-1.40	5.38
6	1.0	-0.28	-2.80	3.80
7	3.0	-0.82	-0.82	2.20

注: ΔT 为温差。

3 结果与分析

3.1 交汇处水动力过程

3.1.1 水平流速分布与剪切层位置

密度差对长江与鄱阳湖交汇河道自由表面的水平流速分布与剪切层位置产生影响。如图 3 所示,高流量条件下长江右侧滩地和鄱阳湖左侧滩地被淹没,与 Li 等^[14]的研究结论一致。在所有模拟的工况中均未发现分离区,这是由于长江与鄱阳湖交汇处平面形态使水流分离作用减弱,并未受到密度差的影响。在长江与鄱阳湖入江水道的交汇顶点附近,观察到一个流速较低的停滞区,其规模随密度差变化不明显,其位置略微倾向高密度水体一侧,因此密度差对停滞区与分离区影响较小。

在长江与鄱阳湖交汇处,自上游停滞区至下游水流恢复区之间,由于强流速梯度的存在,形成了相应的

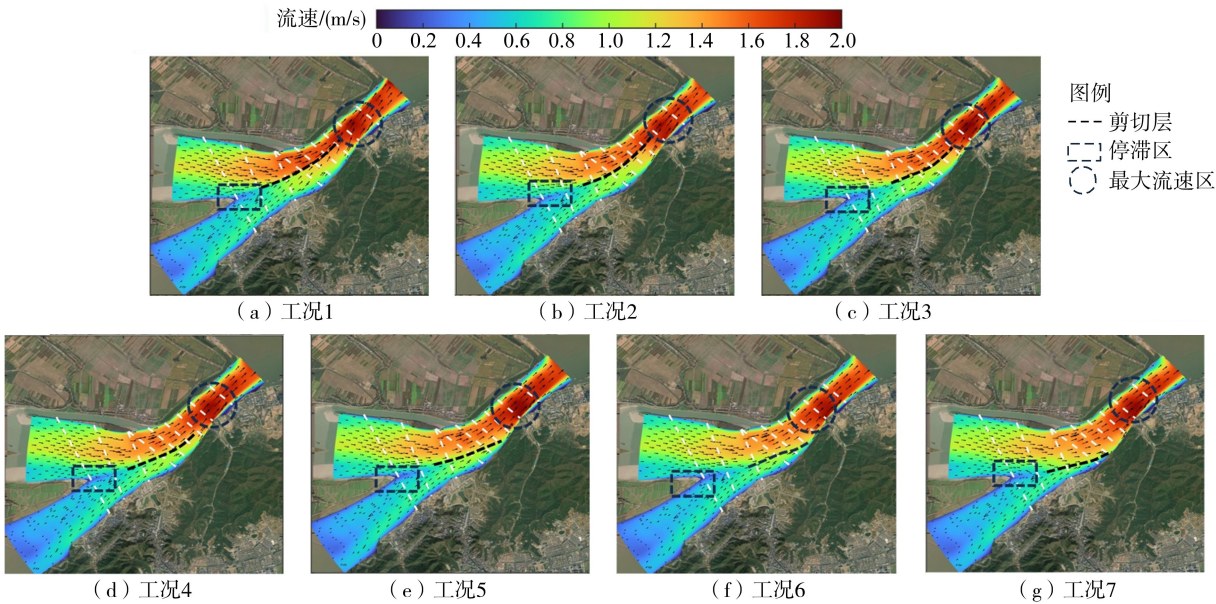


图 3 交汇处附近自由表面水平流速场分布

Fig. 3 Distribution of horizontal flow field on free surface near confluence

剪切层。本文剪切层定义为最大的横向流速梯度所在的位置,如图 3 中黑色曲线所示。对于 $\Delta\rho=0$ 的情况(工况 4),由于长江一侧动量通量较大,剪切层在汇流后向鄱阳湖一侧发展;对于 $\Delta\rho\neq 0$ 的情况,由于密度差产生的浮力,交汇处的流速发生变化。当 $\Delta\rho>0$ 时(工况 1~3),鄱阳湖水将剪切层推向汇流后的河道中心,密度差越大,剪切层越接近汇流河道中心,在汇流后约 3 km(C5 断面)附近与长江河道完全重合;当 $\Delta\rho<0$ 时(工况 5~7),剪切层被推向鄱阳湖一侧,随着密度差的增大,剪切层越靠近鄱阳湖一侧,甚至在密度差较大的工况 7 中,剪切层在汇流后 2 km(C3 断面)处与鄱阳湖侧河岸接触,流速梯度消失。

3.1.2 主流流速分布与二次流结构

图 4 和图 5 为不同工况下主流流速分布与二次流矢量图,二次流矢量由 ZSD 方法(zero net cross-stream discharge definition)确定,该方法计算了一个新的截面,使得流过整个截面的净二次流量为 0,并同时计算了垂直新截面的流速分量(即主流流速)和平行新旋转截面的流速分量(即二次流流速)^[32]。如图 4 所示,当长江水体密度大于鄱阳湖时:①对于高密度工况(工况 1),在交汇初期两股水流汇聚形成向下的流动,自由表面由于存在横向水位差,在离心力与压力梯度不平衡的作用下,两侧来流互相偏转形成小尺度二次流,密度差效应使长江侧水流从底部侵入鄱阳湖,导致掺混层向鄱阳湖一侧产生明显的倾斜,形成类似于闸下异重流的水流结构,增强了鄱阳湖侧的二次流。经过弯曲段(C4 断面),长江侧河道弯曲的平面形态使水流流线产生向左岸方向的弯曲,增强了长江侧的螺旋运动,交汇河道形成一对反向旋转的大尺度二次流,二次流宽度扩展至整个河道尺度,密度差产生的浮力导致水流从床面分离,引起主流流速的重分布,高流速水体核心从长江河道中心向鄱阳湖床面渗透。随着二次流向下游发展,流线弯曲效应减弱,长江侧二次流逐渐消失,鄱阳湖侧二次流占据整个河道,此时两股二次流变为一股顺时针旋转的二次流,并持续至研究区域末端。②对于密度效应较弱的工况(工况 2),观测到鄱阳湖侧二次流规模变小,并且遭到长江侧二次流的挤压,从而向鄱阳湖侧河岸移动,双螺旋结构在交汇下游河道持续存在。③值得注意的是,当密度效应更弱或无密度差(工况 3、4)时,鄱阳湖一侧未出现大尺度二次流结构,长江一侧由流线弯曲驱动的二次流向鄱阳湖侧移动并逐渐占据整个河道,Jiang 等^[33]也通过涡解析模型模拟出了类似的结果,这种现象可能是由于此状况下动量通量比较低(0.17),或是因为大型交汇河道河床糙率相比小尺度交汇河道显著增大,近床面水流运动受到明显影响,破坏了河道尺度二次流的连续性,使二次流的形成和发展受到明显的限制。具体原因还有待今后做进一步的研究。

如图 5 所示,当长江水体密度小于鄱阳湖时,鄱阳湖侧产生一股顺时针的单螺旋结构,尺度由一半的河道宽度逐渐发展为整个河道宽度,螺旋结构位置从长江河岸向交汇河道中心移动。长江水流由表层侵入鄱阳湖,掺混层向长江一侧倾斜,密度差越大侵入越迅速。该异重流运动模式可以增强长江侧由于流线弯曲形

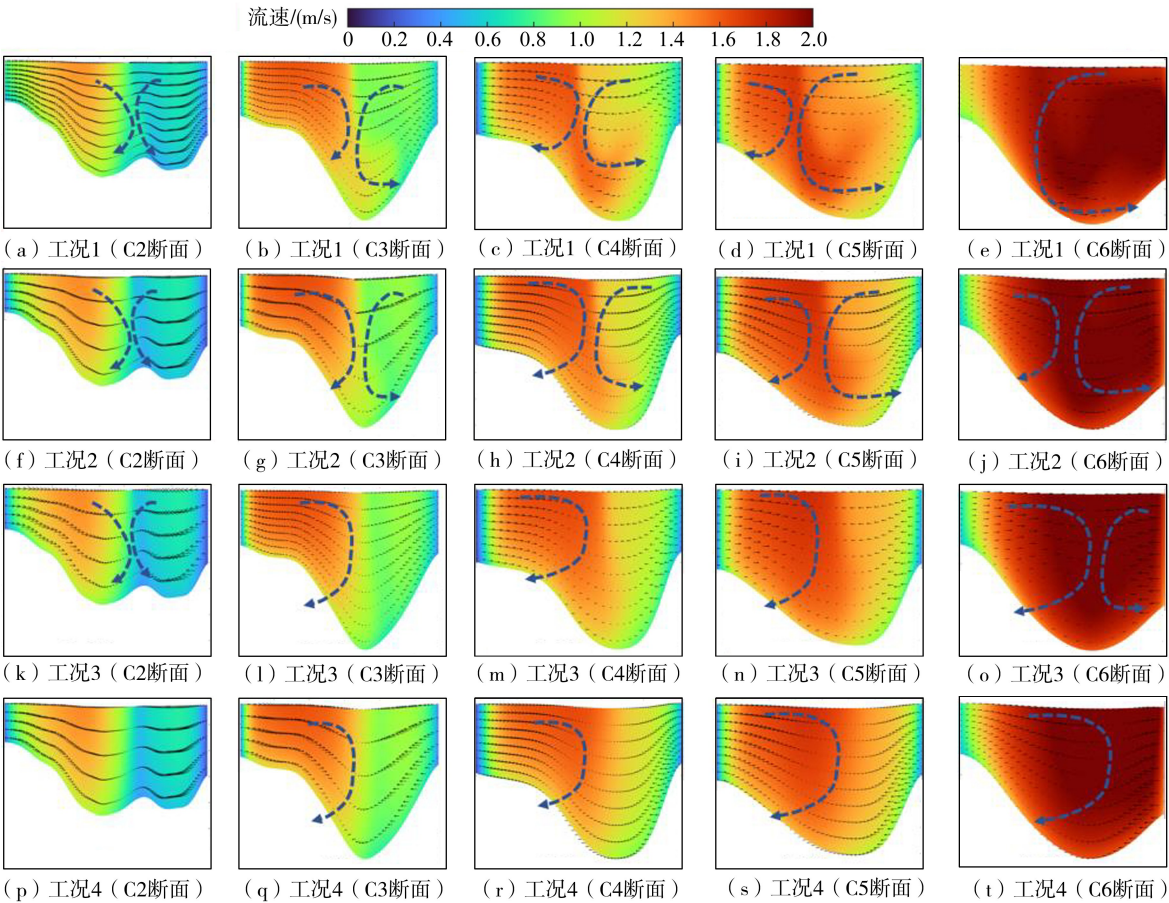


图 4 工况 1~4 交汇河道断面主流流速分布和二次流

Fig. 4 Distribution of primary flow velocity and secondary flow in cross-sections of confluence channel under cases 1-4

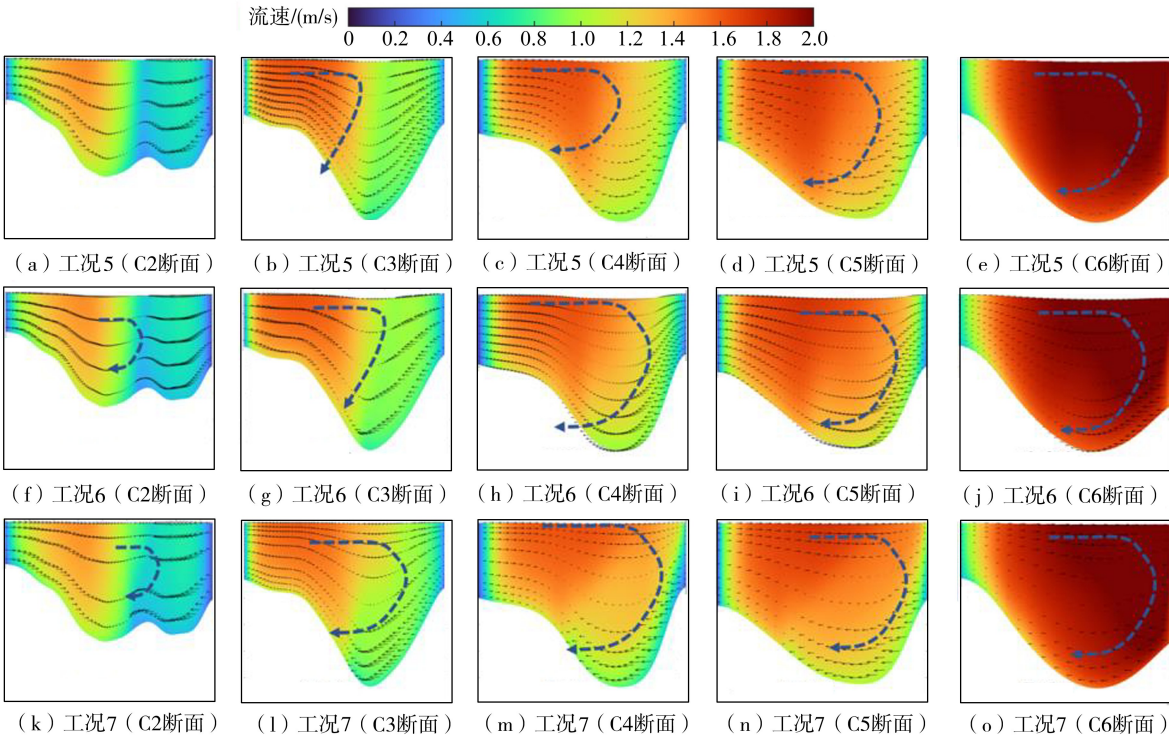


图 5 工况 5~7 交汇河道断面主流流速分布和二次流

Fig. 5 Distribution of primary flow velocity and secondary flow in cross-sections of confluence channel under cases 5-7

成的二次流运动,使二次流规模扩大至河道尺度。高流速水体核心在二次流作用下从长江侧在自由表面向交汇下游河道中心移动,而非从床面侵入。

3.2 交汇处掺混模式

图6为交汇处近水面示踪剂质量浓度等值线图。在 $\Delta\rho\geq 0$ 时(工况1~4),在水面附近存在清晰的混合界面,并保持了很长一段距离。值得注意的是,在 $\Delta\rho$ 较大的工况1中,鄱阳湖水在表层越过了长江水,掺混界面到达长江河岸,与Xu等^[13]的研究结果类似;但在 $\Delta\rho$ 较小的工况2~4中未观测到此现象。由于鄱阳湖侧的低密度水体在水面附近侵入长江侧高密度水体,掺混界面被推向主河道中心线附近,清晰的掺混界面一直持续到研究区域的末端,表现出缓慢的混合过程,这是因为在工况1~3情况下密度差效应必须首先抵消在没有密度差情况下产生的掺混水体的近床侵入,即长江侧螺旋流结构的影响。在 $\Delta\rho<0$ 时(工况5~7),水面附近的混合界面在交汇后很短的距离内(200 m)消失,为快速的掺混过程,这是由于较低密度的长江侧水体侵入自由表面附近,将掺混界面推向了鄱阳湖侧河岸。因此,不同的掺混界面的平面位置可解释密度效应对掺混过程的影响:当主、支流携带不同密度水体时,尽管 Fr_d 相同,但自由表面侵入发展的速度不同,即使是很小的密度差($\Delta\rho=0.14$)也会显著改变掺混界面的位置,直接影响了掺混进程的快慢。密度效应增强了低密度水体在水面附近对高密度水体的侵入作用,当长江水体密度高于鄱阳湖时,对掺混产生促进作用,反之则抑制掺混。

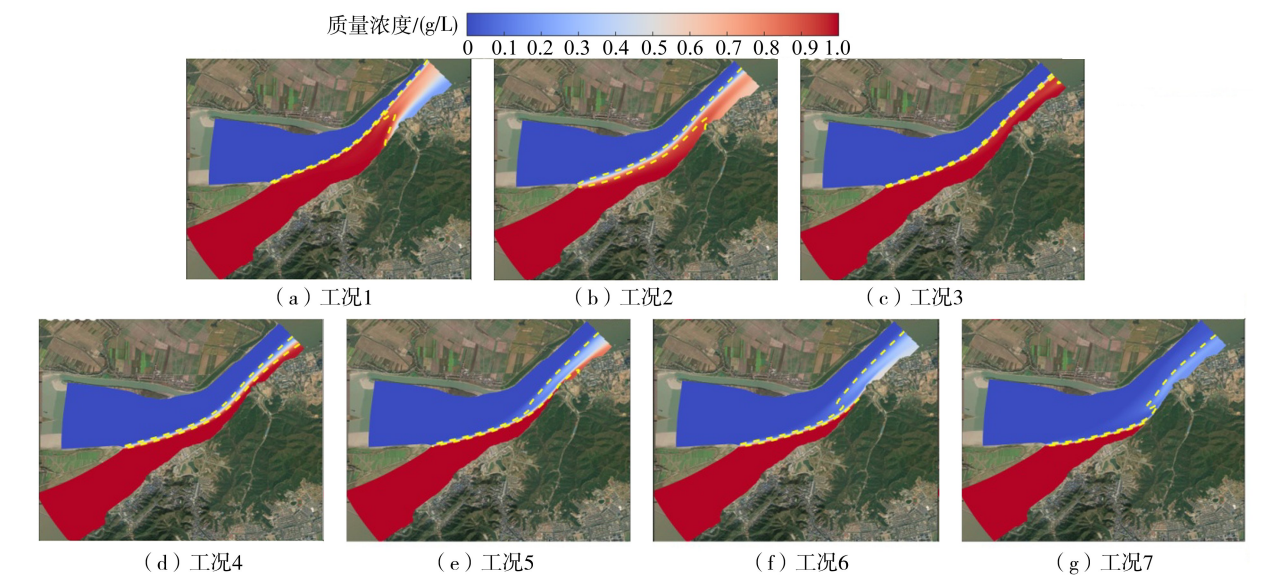


图6 交汇处水面附近示踪剂质量浓度等值线
Fig.6 Contours of tracer mass concentration near water surface of confluence

4 结 论

- a. 密度差对停滞区与分离区影响较小,而对于剪切层,当长江水体密度大于鄱阳湖时,剪切层位于交汇后河道中心;当长江水体密度小于鄱阳湖时,剪切层被推向鄱阳湖一侧。
- b. 长江水体密度小于鄱阳湖时,密度差作用增强了长江侧由于流线弯曲形成的二次流,形成一股顺时针单螺旋结构二次流,且密度差越大,单股二次流规模越大,二次流位置越靠近鄱阳湖一侧。当长江水体密度大于鄱阳湖时,密度差作用会与流线弯曲的作用相抵,形成一对反向旋转的双螺旋结构二次流,且密度差越大,鄱阳湖侧二次流规模越大,二次流位置越靠近下游河道中心。
- c. 存在密度差时,出现水流从床面分离现象,引起了主流的重分布,高流速核心位置向鄱阳湖侧发展。
- d. 密度效应增强了低密度水体在自由表面附近对高密度水体的侵入作用,当长江水体密度高于鄱阳湖时,对掺混产生促进作用,反之则抑制掺混。

参考文献:

[1] 李典,彭振阳,刘国强,等. 河流交汇区水力学特性与水安全研究进展[J]. 长江科学院院报,2025,42(1):11-19. (Li Dian,

Peng Zhenyang,Liu Guoqiang,et al. Research progress on flow characteristics and water safety at river confluences[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2025,42(1):11-19. (in Chinese))

[2] Yuan Saiyu,Tang Hongwu, Li Kun, et al. Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake[J]. Water Resources Research,2021,57(3):e2020WR028284.

[3] 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 at open-channel confluences [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(1):10-17. (in Chinese))

[4] 游宇驰,李志威,余国安,等. 1986—2021 年雅江-尼洋河交汇段辫状河道演变过程[J]. 水科学进展,2023,34(2):265-276. (You Yuchi, Li Zhiwei, Yu Guoan, et al. Evolution of braided river channels in the Yarlung Tsangpo-Niyang River confluence section from 1986 to 2021[J]. Advances in Water Science,2023,34(2):265-276. (in Chinese))

[5] Umar M,Rhoads L B,Greenberg A J. Use of multispectral satellite remote sensing to assess mixing of suspended sediment downstream of large river confluences[J]. Journal of Hydrology,2018,556:325-338.

[6] Lewis Q,Rhoads B,Sukhodolov A, et al. Advective lateral transport of streamwise momentum governs mixing at small river confluences[J]. Water Resources Research,2020,56(9):e2019WR026817.

[7] Sukhodolov A N, Shumilova O O, Constantinescu G S, et al. Mixing dynamics at river confluences governed by intermodal behaviour[J]. Nature Geoscience,2022,16(1):89-93.

[8] 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.

[9] Gualtieri C,Ianniruberto M,Filizola N. On the mixing of rivers with a difference in density:the case of the Negro/Solimões confluence,Brazil[J]. Journal of Hydrology,2019,578(11):1-16.

[10] Rutherford J. River mixing[M]. Chichester:Wiley,1994:26-36.

[11] Rhoads B L,Johnson K K. Three-dimensional flow structure, morphodynamics, suspended sediment, and thermal mixing at an asymmetrical river confluence of a straight tributary and curving main channel[J]. Geomorphology,2018,323:51-69.

[12] 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等. 长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):128-135. (Tang Hongwu,Huang Shujun,Yuan Saiyu,et al. Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(2):128-135. (in Chinese))

[13] Xu Lei,Yuan Saiyu,Tang Hongwu,et al. Mixing dynamics at the large confluence between the yangtze river and poyang lake[J]. Water Resources Research,2022,58(11):e2022WR032195.

[14] Li Kun,Tang Hongwu,Yuan Saiyu,et al. Temporal variations of sediment and morphological characteristics at a large confluence accounting for the effects of floodplain submergence[J]. International Journal of Sediment Research,2022,37(5):619-638.

[15] 曹力玮,湛昱含,高玮峥,等. 交汇区的交汇角和汇流比对微塑料运移的影响[J]. 中国环境科学,2025,45(1):265-277. (Cao Liwei, Shen Yuhan, Gao Weizheng, et al. Effects of confluence angle and discharge ratio on microplastic transport in confluence zones[J]. China Environmental Science,2025,45(1):265-277. (in Chinese))

[16] Tang Hongwu,Zhang Huiming,Yuan Saiyu. Hydrodynamics and contaminant transport on a degraded bed at a 90-degree channel confluence[J]. Environmental Fluid Mechanics,2018,18(2):443-463.

[17] 茅泽育,赵升伟,张磊,等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究[J]. 水利学报,2004,35(2):1-7. (Mao Zeyu,Zhao Shengwei,Zhang Lei,et al. Experimental study on three-dimensional hydraulic characteristics at open channel confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(2):1-7. (in Chinese))

[18] 肖洋,姚晨欣,张涛涛,等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):1-11. (Xiao Yang,Yao Chenxin,Zhang Taotao,et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(2):1-11. (in Chinese))

[19] 汪晨辉,张汇明. 含滩地交汇河道水动力特性与掺混特征数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):89-98. (Wang Chenhui,Zhang Huiming. Hydrodynamic and mixing characteristics of river confluence with floodplain[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):89-98. (in Chinese))

[20] Shen Xia,Li Sheng,Cai Huanjie,et al. The response mechanism of transversal mixing of dissolved oxygen to the evolution of secondary flow at the confluence[J]. Journal of Hydrology,2024,635:131184.

[21] 曾诚,尹雨然,陈辰,等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(2):9-15. (Zeng Cheng, Yin Yuran,Chen Chen,et al. Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(2):9-15. (in Chinese))

[22] 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.

[23] Duguay J, Biron P M, Lacey J. Impact of density gradients on the secondary flow structure of a river confluence[J]. Water Resources Research, 2022, 58(10): e2022WR032720.

[24] Lee M, Park Y S, Ko J S, et al. The influence of density difference, discharge ratio and wind on the mixing at large river confluence[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2024, 56: 1-15.

[25] Cheng Zhengyang, Constantinescu G. Stratification effects on flow hydrodynamics and mixing at a confluence with a highly discordant bed and a relatively low velocity ratio[J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4537-4562.

[26] Shi Lidi, Sun Jian, Lin Binliang, et al. Hydro-thermodynamic processes at a large confluence under reservoir regulation[J]. Water Resources Research, 2022, 58(12): e2022WR033315.

[27] 王彪, 朱建荣, 吕爱琴. 珠江河口磨刀门枯水期盐度统计模型[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 42-48. (Wang Biao, Zhu Jianrong, Lyu Aiqin. Salinity statistical model for Modaomen of Pearl River Estuary during dry season[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 42-48. (in Chinese))

[28] Ramón C L, Armengol J, Dolz J, et al. Mixing dynamics at the confluence of two large rivers undergoing weak density variations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(4): 2386-2402.

[29] Ramón C L, Prats J, Rueda F. The influence of flow inertia, buoyancy, wind, and flow unsteadiness on mixing at the asymmetrical confluence of two large rivers[J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 11-26.

[30] Hu Lihan, Xu Jin, Han Jianjun, et al. Three-dimensional hydrodynamics and morpho-dynamics at a tidal river junction[J]. Estuaries and Coasts, 2023, 47(2): 376-396.

[31] Horna-Munoz D, Constantinescu G, Rhoads B, et al. Density effects at a concordant bed natural river confluence[J]. Water Resources Research, 2020, 56(4): e2019WR026217.

[32] Finotello A, Ghinassi M, Carniello L, et al. Three-dimensional flow structures and morphodynamic evolution of microtidal meandering channels[J]. Water Resources Research, 2020, 56(7): e2020WR027822.

[33] Jiang Chenyu, Constantinescu G, Yuan Saiyu, et al. Flow hydrodynamics, density contrast effects and mixing at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake channel[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2022, 23(2): 229-257.

(收稿日期: 2024-12-24 编辑: 熊水斌)

+++++

(上接第108页)

[13] 公海涛, 陈志华, 盛斌, 等. 基于孪生网络和 Transformer 的小目标跟踪算法 SiamTrans[J]. 计算机应用, 2023, 43(12): 3733-3739. (GONG Haitao, CHEN Zhihua, SHENG Bin, et al. SiamTrans: tiny object tracking algorithm based on Siamese network and Transformer[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(12): 3733-3739. (in Chinese))

[14] 张龙威, 刘小生, 刘相杰. 基于 BES-BiLSTM 的混凝土坝变形预测[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 94-97. (Zhang Longwei, Liu Xiaosheng, Liu Xiangjie. Deformation prediction of concrete dam based on BES-BiLSTM[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(9): 94-97. (in Chinese))

[15] 欧斌, 张才溢, 陈德辉, 等. 基于改进 EMD-LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 93-99. (Ou Bin, Zhang Caiyi, Chen Dehui, et al. Deformation prediction model for concrete dams based on improved EMD-LSTM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 93-99. (in Chinese))

[16] 王瑞琪. 长短期记忆网络在模型预测控制中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.

[17] 王耀辉, 薛贵军, 赵广昊. 基于改进沙猫群算法优化 CNN-BiLSTM 的热负荷预测[J]. 现代电子技术, 2024, 47(14): 20-29. (Wang Yaohui, Xue Guijun, Zhao Guanghao. Optimised CNN-BiLSTM for heat load prediction based on improved sand cat swarm algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(14): 20-29. (in Chinese))

[18] 张栩, 颜伟, 李辉, 等. 基于 QR-BiGRU 神经网络与区间抗差增广状态估计的线路参数区间追踪估计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(23): 7406-7417. (Zhang Xu, Yan Wei, Li Hui, et al. Interval estimation and tracking method for transmission line parameters based on QR-BiGRU neural network and interval robust augmented state estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(23): 7406-7417. (in Chinese))

[19] 易海燕. 基于小波分解和卷积神经网络的光伏发电功率预测方法[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.

[20] 翁鸣昊, 项兴华, 陈俊涛, 等. 基于 LSTM 与 Transformer 的大坝变形预测研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(4): 250-257. (Weng Minghao, Xiang Xinghua, Chen Juntao, et al. Dam deformation prediction research based on LSTM and transformer[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(4): 250-257. (in Chinese))

[21] 秦俊德. 陈村大坝坝基渗压问题的探讨[J]. 大坝与安全, 1991(4): 28-33. (Qin Junde. Discussion on the seepage pressure problem of Chencun Dam foundation[J]. Dam and Safety, 1991(4): 28-33. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-11-05 编辑: 熊水斌)