

径潮耦合作用下长江下游典型入江支流 潮流界迁移机制与模拟

李一平^{1,2}, 韩清云^{1,2}, 程月^{1,2}, 凌祺^{1,2}, 戴妍^{1,2}, 王亚宁^{1,2}, 朱秀全³

(1. 河海大学环境学院; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室;
3. 中水淮河规划设计研究院有限公司)

摘要:为研究水体倒灌入河道的上溯距离,厘清潮流界的主控机制和动态规律,以长江下游南京段典型入江支流石碛河为例,模拟了 302 组径流、潮差工况,量化了偏枯水年潮流界位置的变动范围,探讨了径潮耦合作用对潮流界位置的影响。结果表明:研究区潮流界变动范围为 0~7.64 km,径流量是控制潮流界位移的主导因子,径流每增加 1 m³/s 可使潮流界下移近 3.9 km,而潮差需增加 7 倍以上才能使潮流界产生相应的位移;受下游顺直河势影响,干支流交汇区是潮流界的核心稳定区,该地形能有效减少浅滩与分叉造成的阻力,使潮流界在高低顶托水位下均能保持较高比例(66%~75%)的稳定分布;潮流界到入江口距离随潮径比增大呈阶梯式、非线性向上游迁移,与干流的对数型变化差异大;长江干流因其径流更大、潮汐动力更强,潮流界对径流的敏感性更低,变动范围为支流的 0.86 倍。

关键词:感潮河段;潮流界;径流;潮差;水动力模型;石碛河;长江下游

Mechanism and simulation of tidal current limit in typical inflow tributaries of the lower Yangtze River under coupling effect of runoff and tide//Li Yiping^{1,2}, Han Qingyun^{1,2}, Cheng Yue^{1,2}, Ling Zhen^{1,2}, Dai Yan^{1,2}, Wang Yaning^{1,2}, Zhu Xiuquan³(1. College of Environment, Hohai University; 2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 3. China Water Huaihe Planning and Design Research Co., Ltd.)

Abstract: In order to study the upstream distance of water backflow into the river channel, clarify the main control mechanism and dynamic laws of the tidal current limit, taking the Shiqi River, a typical tributary of the Nanjing section of the lower Yangtze River, as an example, 302 sets of runoff and tidal range conditions were simulated, and the variation range of tidal current limit in relatively dry years was quantified. The influence of runoff-tidal coupling on the tidal current limit was explored. The results show that the variation range of tidal current limit in the study area is from 0 to 7.64 km, and runoff is the dominant factor controlling the displacement of the tidal current limit. For every 1 m³/s increase in runoff, the tidal current limit can be moved down by nearly 3.9 km, while the tidal range needs to be increased by more than 7 times to generate corresponding displacement in the tidal current limit. Affected by the downstream straight river regime, the confluence area of main and tributary rivers is the core stable zone of the tidal current limit. This terrain can effectively reduce the resistance caused by shallow shoals and bifurcations, allowing the tidal current limit to maintain a stable distribution with a high proportion (66%~75%) at both high and low top water levels. The distance from the tidal current limit to the estuary shows a stepped and non-linear upward migration with the increase of tidal-runoff ratio, which is different from the logarithmic change of the main stream. The tidal current limit in main stream of the Yangtze River is less sensitive to runoff due to its larger runoff and stronger tidal dynamics, with a variation range of 0.86 times that of tributaries.

Key words: tidal river; tidal current limit; runoff; tidal range; hydrodynamic model; the Shiqi River; the lower Yangtze River

长江感潮地区的河道水动力及水体活动易受潮汐作用影响^[1],在下游潮汐水体的顶托作用下,水

流不断向上游追溯直至流速为 0,该断面位置即为潮流界^[2]。潮流界是感潮河口重要的水文特征参

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3204400);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B230204002);国家自然科学基金重点项目(52039003)

作者简介:李一平(1978—),男,教授,博士,主要从事流域水环境综合治理研究。E-mail:liyiping_hhu@163.com

数,反映了径流量与潮汐共同作用下的水动力格局,其位置受上游径流量、下游潮差及河床地形等因素影响^[3-4]。掌握潮流界的时空变化有助于识别泥沙沉积区域、判断水质迁移边界^[5-6],对生态治理与河口演变研究具有重要意义。古俊豪等^[7-10]基于实测数据对长江的潮流界开展了研究。但由于长时间跨度的实测数据较难获取,越来越多学者采用数值模型对潮流界进行模拟分析,研究对象主要集中于如长江、黄河等流量大、潮汐影响范围广的入海干流^[11-14]。然而,与主河道相比,通江支流由于断面狭窄、水位坡降大、河口地形复杂,且同时受到主河道潮汐顶托与支流径流量变化的双重调控,其潮流界具有更显著的非线性响应和更高的动态不稳定性。当前对支流潮流界的研究相对薄弱,多数模型基于小时或日尺度的边界条件,难以精细揭示潮流界在潮周期内的时空变化特征。

鉴于此,本文选取长江下游典型入江支流——石碛河为研究对象,依托布设于支流小流域内的高精度流量计与水位计,构建高精度水动力模型,分析汛期不同径潮组合条件下潮流界的位置变化特征与主控因素,以期有感潮支流水动力识别与气候变化下河口水文调控管理提供理论支撑。

1 研究区概况

南京市的地理位置为 $31^{\circ}14'N \sim 32^{\circ}36'N$ 、 $118^{\circ}22'E \sim 119^{\circ}14'E$,石碛河是长江下游南京段北岸支河,位于南京市浦口区,受潮汐与径流量双重影响显著^[15-16](图1)。石碛河上至三岔水库溢洪道,流经侯家坝镇区,最终由气盾坝处汇入长江,沿程有坝西河、孙垄河、玉莲河、蒋山口水库溢洪道、明因寺沟、南二山洪沟、兰花沟等支流河道汇入。石碛河为南京市骨干河道,是浦口区境内重要通江支流,流域汇水面积约为 133.18 km^2 ,三岔水库河道以下的河

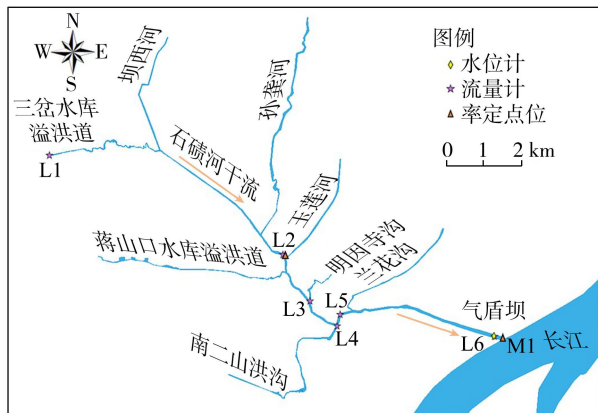


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

道长度为 15.4 km 。石碛河流域为通江小流域,呈明显的季风气候,具有四季分明、雨量丰富的气候特征。多年平均气温为 15.4°C ,多年平均降水量为 1004.57 mm ,降水量年内分配不均匀,年际变化较大。

2 研究方法

2.1 水动力模型构建

选择适合于平原河网的水环境数值模型^[17]构建研究区水动力模型,该模型基于一维明渠非恒定流运动规律,以圣维南方程组作为基本控制方程,采用六点隐式差分法进行离散求解。建模数据来源于流域布设的 HXCAR-3400 雷达流量计与 PRC-921 超声波水位计,流量计 L1、L2、L5、L6 布设于石碛河干流,L3、L4 布设于支流,水位计 M1 布设于石碛河下游气盾坝。为确保数据的连续性和时效性,所有监测设备均设定为每 5 min 自动记录一次数据,以捕捉到水流和水位在短时间内的波动,与试验组通过多普勒流速仪测定得到的流量较为符合,数据质量可靠。研究期选为长江流域偏枯水年时期,2023年5月1日至2023年7月31日。通过6处流量计和1处水位计的持续监测,共收集了26496组高质量水文数据,为建模提供基础。

研究区河网包括石碛河干流及7条支流,干流上游为三岔水库溢洪道,下游入江口为气盾坝,由于研究期为汛期,气盾坝处于放下状态,此时对河道流量不具备调控作用。

构建的水动力模型共设置9个边界,上游及7条支流的入流边界均为流量边界,下游入江口为水位边界。布设流量计的支流入流量采用流量计监测值;其他支流依据流域面积-流量关系,并耦合干支流流量计监测值的相关关系进行计算;下游水位采用水位计监测值。参考凌祺等^[18]的研究,糙率取 0.03 。

选取石碛河干流 L2 的流量和长江 M1 的水位数据进行模型验证,利用绝对误差平均值(AE)和均方根误差(RMSE)作为评价指标,AE反映模拟值与实测值的贴合程度^[19],RMSE反映样本的离散程度^[20],AE、RMSE值越小,模拟效果越好^[21]。验证结果表明,L2流量模拟结果的AE为 $0.091 \text{ m}^3/\text{s}$,RMSE为 0.022 ;M1水位模拟结果的AE为 0.009 m ,RMSE为 0.017 ,水动力模型精度较高,可用于后续计算分析。

2.2 模拟工况设置

为探究石碛河上游及所有支流的总径流量、长江顶托水位、下游长江潮汐作用3种因素分别对潮流界位置的影响,将3种因素进行组合,设置低顶托

水位-径流量、低顶托水位-潮差、高顶托水位-径流量、高顶托水位-潮差 4 类因素组合。低顶托水位设为 5.11 m, 高顶托水位设为 7.11 m, 对应的大潮差为 0.36 m, 小潮差为 0.15 m, 同一历史潮周期内, 大潮差与小潮差的比例为 0.43; 单影响情景设置中, 径流量为 32 种, 潮差为 62 种。探究潮差影响时, 设定径流量为 $1.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 。此外, 设定潮差的变化范围为 0.1~0.7 m, 径流量的变化范围为 0.1~ $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

在研究单一因素对潮流界位置影响的基础上, 引入蒙特卡罗随机抽样法^[22], 构建基于概率统计的多因素耦合工况。具体实施步骤为: ①根据上述 4 类因素组合的模拟结果确定径流量与潮差的取值区间; ②采用蒙特卡罗随机抽样法构建包括典型工况和极端工况的多变量耦合工况集; ③在低、高长江顶托水位条件下各生成 104 组工况, 共 208 组工况 (图 2)。

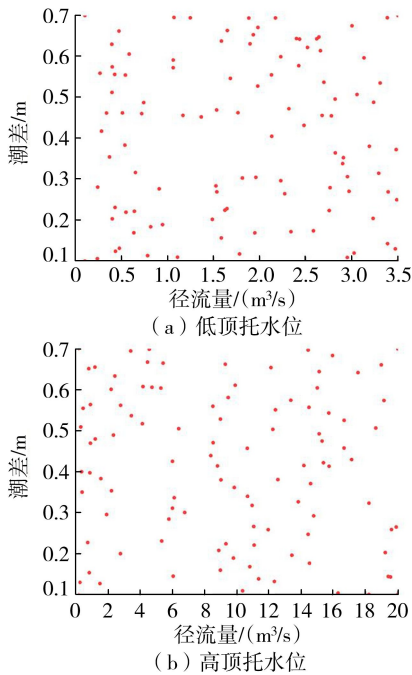


图 2 不同长江顶托水位条件下生成的工况分布

Fig. 2 Distribution of working conditions generated under different Yangtze River backwater levels

2.3 潮流界位置确定依据

潮流界的位置判定方法主要有流速法和盐度法^[23], 由于盐度资料难以获取, 本文选择流速法判定潮流界的位置, 即涨潮流所能达到的最远距离。计算潮流界位置的距离为“入江口-潮流界”的干流河道长度。潮波随潮汐作用在向上游追溯的过程中其能量逐渐与上游径流能量相互抵消, 越往上游, 其水流状况越弱; 当向上游追溯的水流流速变为 0 时, 此时的断面即为潮流界的位置, 此断面上流速为正

值, 下游流速为负值, 图 3 为潮流界位置示意图。

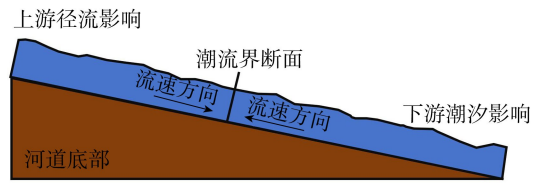


图 3 潮流界位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tidal current limit

3 结果与分析

3.1 入江支流径潮动力特性分析

3.1.1 径流特征与变化规律

图 4 为 2023 年流量计观测数据的统计结果, 可见流量计 L2~L6 均会出现瞬时读数为 0 的情况, 此时水体处于静止状态。这种现象是由于下游潮汐水体向上游推进时与上游下泄水流形成水力平衡所致, 由此可以判定石碛河感潮区段的最远影响边界可达 L2 位置断面。从空间上来看, 流量波动幅度沿程递增, L1 位置的流量基本稳定, L2 (标准差 $\sigma = 0.17$)、L4 ($\sigma = 0.36$) 位置的瞬时流量变化相对稳定, 而 L3 ($\sigma = 0.41$)、L5 ($\sigma = 0.45$)、L6 ($\sigma = 0.45$) 位置的瞬时流量波动较大, 且异常值多于上中游, 本文选用 3σ 原则对异常值进行剔除。从干流的 L1~L3 和 L5~L6 可以看出, 越靠近入江口 (L6), 潮汐顶托作用越显著, 致使瞬时流量频繁出现增大现象。L1、L2 位于干流上游, 没有受到强烈干扰, 水流相对稳定, 因此流量变化较为平缓; L3、L4 位于干支流汇入点, 流量波动受干流与支流水流的共同影响, 水流相互叠加、顶托, 放大了流量变化, 此外, 交汇处容易产生漩涡和回流区^[24], 导致水流方向不稳定, 使流量计间歇性地测量到正向主流或相对静止的水体, 从而造成净流量读数剧烈跳动, 并频繁出现瞬时 0 值; 相比之下, L5、L6 均位于干流河道下游, 经过一段距离的流动, 来自支流的水体与干流充分混合, 复杂的紊流能量逐渐耗散, 但同时受长江潮汐动力控

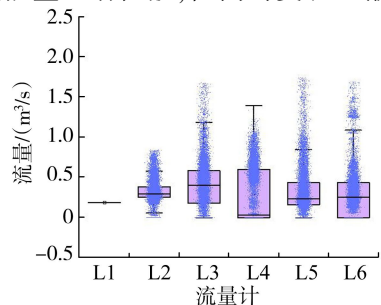


图 4 2023 年流量计观测数据的统计结果

Fig. 4 Statistical results of flow meter observation data in 2023

制,瞬时流量波动频繁。石碛河流量时空变异主要受潮汐动力与上游来水的相互作用控制,L2 位置断面可作为感潮区上界的标志性位置。

三岔水库位于干流最上游,出库流量控制在一定范围内,恒定的流量确保了水库下游水流的稳定性,为整个流域提供了重要的水源。图 5 为 2023 年流量计的观测数据,可见流域中游 L2 位置的流量相对稳定,日流量在 $0.2 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内波动,日流量变化不超过约 $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$;L3、L4、L5 位置的流量波动较大,日流量在 $0 \sim 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内波动,日流量变化相对较大,呈多峰分布,最高可达约 $1.73 \text{ m}^3/\text{s}$,体现了径流与潮流的频繁相互作用;在潮汐作用较弱的情况下,L6 位置的流量基本稳定,在 $0 \sim 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内波动。由图 5 可见,区间①出现流量峰值是受潮汐顶托的影响,流量强度从上游至下游呈现先减弱又增强的趋势;区间②和③的流量峰值均由径流主导,从上游至下游流量逐渐减小^[25]。总体来说,石碛河沿程流量差异是由干流径流、支流汇入、水体交互、下游顶托等多种因素共同影响。

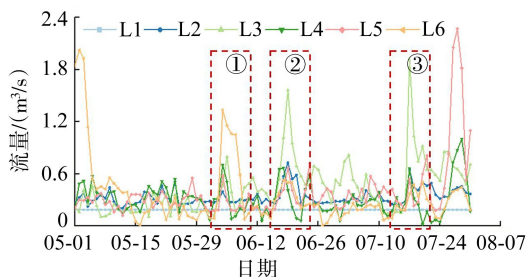


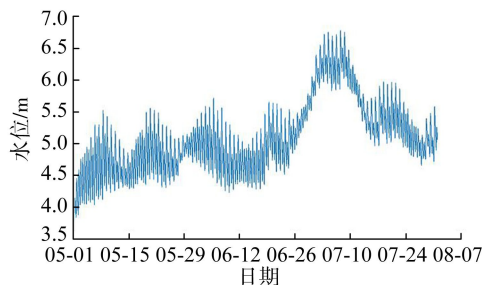
图 5 2023 年流量计的观测数据

Fig. 5 Monitoring data of flow meter in 2023

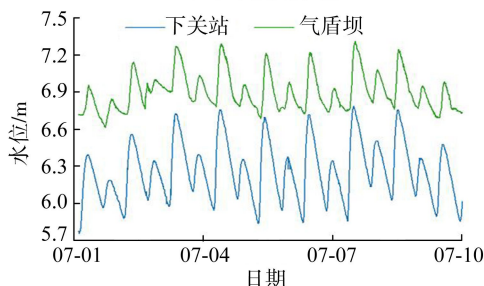
3.1.2 潮汐响应特性

长江口是中等强度的潮汐河口,属于典型的非正规半日潮型^[7],其潮汐特征表现为:涨潮平均历时约 5 h,落潮平均历时约 7.4 h。潮差沿程分布呈现非线性衰减特征,从入海口附近的约 2.8 m 逐渐减小至南京站的约 0.6 m^[26]。与研究区相距最近的长江水位站为下关站,统计研究时段内下关站的水位数据,共 254 组涨落潮信息(图 6)。本文所提及的高低顶托水位均为一个涨潮(或落潮)时间段内的中程数,其中长江下关站的最低顶托水位为 4.16 m,最高顶托水位为 6.47 m,最小潮差为 0.12 m,最大潮差为 1.25 m。

水位计位于气盾坝上游,监测石碛河入江前的水位数据。气盾坝在汛期放下,在非汛期升起,本文选取具有周期性变化规律的 7 月 1—9 日水位计监测数据进一步分析,此时长江正处于高顶托水位状态,共 34 组涨落潮数据。韩雪梅等^[27]的研究表明,潮汐河道涨潮与落潮的持续时间呈现规律性变化,



(a) 下关站水位



(b) 下关站与气盾坝水位对比

图 6 2023 年下关站和气盾坝的水位

Fig. 6 Water level of Xiaguan Station and Gas Shield Dam in 2023

越往上游涨潮过程的持续时间越短,而落潮过程的持续时间越长,这种涨落潮时间的不对称性随上游距离增加而明显增强。下关站涨潮历时约 4 h,落潮历时约 5 h;气盾坝涨潮历时约 3 h,落潮历时约 10 h。由于气盾坝与下关站的距离差,因此其涨落潮存在时间滞后性,同一潮汐时段内气盾坝约滞后下关站 1 h。气盾坝在高顶托水位条件下的平均水位为 7.11 m,低顶托水位条件下为 5.11 m,根据下关站与气盾坝同一潮汐时段内的水位差来计算得到。

3.2 低顶托水位潮流界识别结果与特征

低顶托水位条件下共收集 31 组潮差、16 组径流量,潮差、径流量与潮流界位置的关系如图 7 所示。由图 7 可见,潮差影响下的潮流界到入江口的距离范围为 1.74 (靠近入江口)~4.54 km (南二山洪沟汇入口)。模型选配遵循逐步优化原则^[28],先采用一阶函数进行拟合,若其 R^2 不满足精度阈值,则升级至二阶乃至更高阶多项式进行拟合。经计算,本文采用三阶多项式进行拟合,与侯成程等^[29]的研究结果一致。潮汐是潮流上溯的主要动力,随着潮差的增大,潮流界位置不断向上游追溯。在潮差增大初期,潮流界到入江口的距离变化较大,由 1.74 km 增至 3.91 km (兰花沟汇入口),由于河道主枝叉地形的影响,此时增大潮差对潮流界的影响较小,说明部分水体随潮差增大向支流追溯,而干流的水体处于动态平衡之中;当潮差增大至 0.32 m,潮流界位置有所上移,但由于南二山洪沟与兰花沟距离较近,当潮差增至 0.38 m 后,潮流界位置相对稳定在南二山洪沟汇入口。

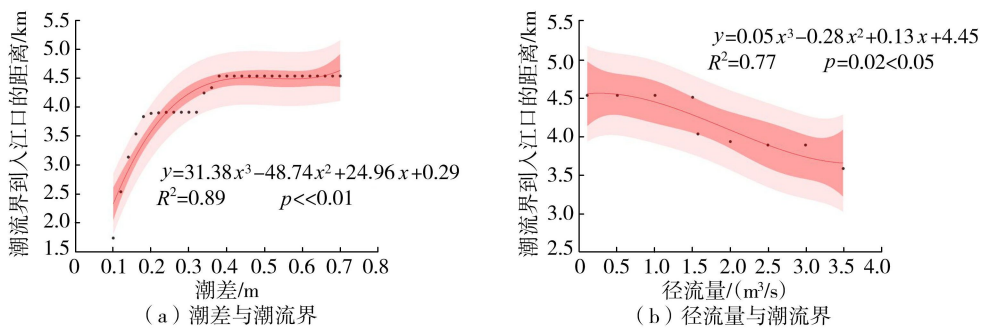


图 7 低顶托水位条件下潮差、径流量与潮流界位置的关系

Fig. 7 Relationship between tidal range, runoff and tidal limit position under low-tide conditions

径流量影响下的潮流界到入江口的距离范围为 0(入江口)~4.54 km(南二山洪沟汇入口)。当径流量高于 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,径流为完全主导作用,潮流界始终位于入江口处,不再向上游追溯,径流对于水体上溯起到阻碍作用。当径流量增大时,潮波向上游追溯的能量被削弱,潮汐作用减小,潮流界向下游入江口靠近;当径流量减小时,潮汐占主导作用,潮流界向上游追溯。当径流量为 $0.1 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,潮汐与径流作用相当,潮流界位于南二山洪沟汇入口;当径流量为 $1.5 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,径流占主导作用,逐渐削弱潮波能量,使潮流界逐渐靠近下游入江口。

3.3 高顶托水位潮流界识别结果与特征

高顶托水位条件下收集 31 组潮差、16 组径流量,潮差、径流量与潮流界位置的关系如图 8 所示。由图 8 可见,潮差影响下潮流界到入江口的距离为 5.84~7.79 km。相比低顶托水位条件,潮流界主要分布于中游,变动范围相对较小,受河道地形及分汊河道的影响为主。当潮差由 0.1 m 增加至 0.2 m,潮流界到入江口的距离由 5.84 km 逐渐增加至 6.59 km;当潮差在 0.2~0.26 m 和 0.28~0.38 m 范围内变化时,潮流界到入江口的距离分别保持在 7.19 km 和 7.24 km,两处断面均位于干流河道蜿蜒处,距分汊河道较近;当潮差大于 0.4 m,此时基本接近潮差的上限值,潮流界的变动范围为 50 m 左右。

径流量影响下,潮流界到入江口的距离范围为 0~7.64 km。随着径流量的增加,潮流界位置逐渐向入江口迁移,在径流量增加初期,潮流界整体接近线性变化。径流量每增加 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$,潮流界变化幅度为 100 m 左右;当径流量增加至 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,潮流界位于 4.54 km(南二山洪沟汇入口)处,稳定在干支流汇入口附近;当径流量增加至 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,径流量为主导因素,潮流界大幅度向入江口靠近;当径流量增加至 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,潮流界位于入江口,此时径流作用超过潮汐作用,不论是涨潮还是落潮,整个河道的水体均为正向流,无负向流出现。

3.4 径潮单独驱动下潮流界的位置响应

潮流界的位置变化本质上是潮汐动力与河流动力动态平衡的结果^[30],这一过程受水位条件、径潮动力对比及河道地形特征的影响,其位置变化直接影响水体上溯的范围和强度。结合不同长江顶托水位条件,潮差恒定时,径流量每增加 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 可驱动潮流界下移 0~3.90 km;径流量恒定时,潮差需增加约 7 倍以上才会引起潮流界的明显位移,说明径流对潮流界位置的影响明显大于潮汐,这一结论与韩雪梅等^[27]的研究结果一致。

以径流量作为主控变量时,潮流界迁移距离与径流量呈负相关关系。在两种顶托水位条件下,径流量的增加都会导致潮流界向下游迁移,且这一过程受河道地形的影响相对较小。具体而言,高顶托

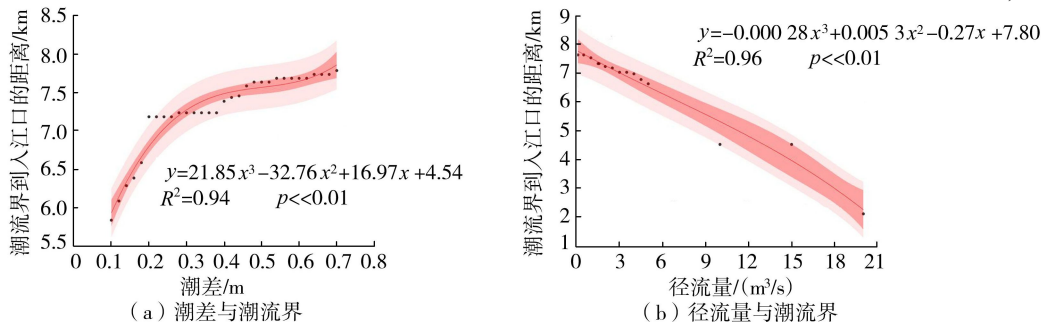


图 8 高顶托水位条件下潮差、径流量与潮流界的位置关系

Fig. 8 Relationship between tidal range runoff and tidal limit position under high-tide conditions

水位时径流量增加会线性抑制潮汐动力,导致潮流界明显下移;低顶托水位时虽然影响程度相对较小,但同样表现出抑制水体上溯的趋势。

以潮差作为主控变量时,潮流界迁移幅度呈现较为明显的地形约束性特征。高顶托水位条件下,由于上游河道地形陡峭且浅滩较多,河道摩擦力对潮汐的削弱作用增强,导致水体上溯能力减弱,潮流界迁移范围较小,为 (6.81 ± 0.98) km;低顶托水位条件下,下游河道较为顺直且浅滩较少,摩擦力减小使得潮波传播更为顺畅^[31],潮流界迁移范围明显增大,为 (3.14 ± 1.4) km。进一步体现了潮差影响系数在不同水位条件下的差异,即低顶托水位时三次项拟合公式的系数更大,潮汐动力敏感性更强^[32],而高顶托水位时以地形摩擦效应为主。

潮汐影响大多发生于入江河道^[31],对比沿程汇入长江的各河道特性,越接近长江入海口的支流,其水文状况受潮汐作用的影响愈发明显^[33]。近海支流的水位变化、流速分布及泥沙淤积等均与潮汐的周期性涨落紧密相关,潮汐动力对河口区域的支流起主导作用。向长江上游追溯,越远离长江入海口支流的水文特征越受制于上游径流量的变化^[34]、河

道自身的地形复杂性以及分叉支流的分布条件。综上所述,长江感潮区域潮流界的迁移过程呈现出明显的空间梯度特征:从入海口至上游,控制机制由潮汐主导逐步过渡为径流作用主导。

3.5 径潮耦合作用对潮流界的协同影响

基于蒙特卡罗随机抽样法生成 208 组径潮因素耦合工况,对径潮耦合作用对潮流界的协同影响进行分析,结果如图 9、图 10 所示。低顶托水位条件下 75% 的潮流界位于干支流交汇断面,基本集中于南二山洪沟以下;高顶托水位条件下 66.35% 的潮流界位于干支流交汇断面,其迁移范围延伸至孙垄河(距河口 8.03 km),说明水位顶托对潮流界变化范围具有扩展效应。由图 9、图 10 可见,高、低顶托水位的潮流界趋势曲面均呈现“阶梯状”,这是因为大多数潮流界出现在干支流交汇断面,使得曲面出现“平台”。观察二维投影图可以发现,当潮差保持不变,径流量的变化能够明显影响潮流界;当径流量不变,潮差在一定范围内变化时潮流界保持不变,这与前文结论保持一致。当径流量较小(低于 $1 \text{ m}^3/\text{s}$) 时,潮差需增加较多(1~6 倍)才会使潮流界向上迁移。

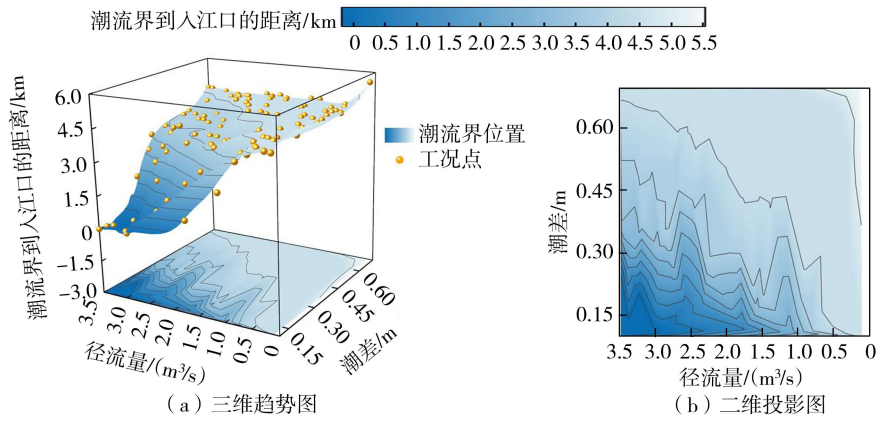


图 9 低顶托水位条件下潮流界的三维趋势图与二维投影图

Fig. 9 Three-dimensional trend map and two-dimensional projection of tidal current limit under low-tide conditions

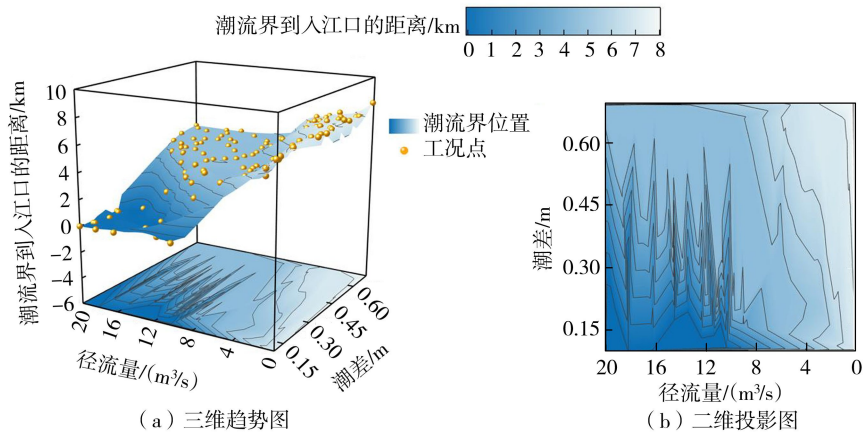


图 10 高顶托水位条件下潮流界的三维趋势图与二维投影图

Fig. 10 Three-dimensional trend map and two-dimensional projection of tidal current limit under high-tide conditions

参考朱巧云等^[23]的研究,利用潮径比表征径潮动力耦合作用,其定义为下游潮差与0.1倍上游径流量的比值。经分析发现,低顶托水位条件下潮径比为0.29~21.24,高顶托水位条件下潮径比为0.05~17.74,且潮流界到入江口的距离与潮径比呈明显的正相关关系,低顶托水位条件下 $R^2=0.59$,高顶托水位条件下 $R^2=0.75$ 。同时,基于7月3—9日12组实测涨落潮数据,计算得到潮径比为1.47~6.76,对应的潮流界到入江口的距离为6.55~7.64 km;小潮差期间,潮径比为1.47~5.54,83.33%的潮流界位于蒋山水库溢洪道汇入口,大潮差时,潮径比为3.40~6.76,潮流界随潮径比的增大逐渐向上游靠近。

图11为潮径比与潮流界位置的关系。由图11可见,潮径比增大时,潮流界向上游非线性迁移,到入江口距离增大,潮流界具有“阶梯式”的迁移规律;反之则向下游迁移。结果表明,不同长江顶托水位条件下潮径比阈值对潮流界迁移具有调控作用,低顶托水位条件下,潮径比为2.00~21.24时,95%的潮流界位于4.54 km(南二山洪沟汇入口),可见该区段的潮流界具有空间稳定性;当潮径比小于2时,潮流界到入江口距离呈接近线性递减趋势;当潮径比为0.72~1.10时,每减少0.2,潮流界向下游迁移1.62 km,直至潮径比小于或等于0.72时完全退至入江口。高顶托水位条件下呈三阶段演化特征,潮径比大于0.72时,随潮径比的增大潮流界快速上移;潮径比为0.23~0.71时,92%的潮流界位于4.54 km(南二山洪沟汇入口);潮径比小于0.23后,随潮径比增大,潮流界呈现断崖式迁移特征,当潮径比小于0.18潮流界完全退至入江口。

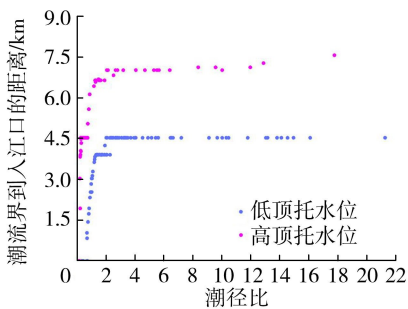


图11 潮径比与潮流界位置的关系

Fig. 11 Relationship between tidal diameter ratio and position of tidal current limit

长江干流潮径比与潮流界位置的关系呈对数型关系^[23],与入江支流存在明显差异。造成这种差异的主要原因包括:①长江干流径流量远大于支流,加上上游水库的不定期蓄放水导致径流量波动更大^[35],使得干流潮流界在约70 km范围内变动;

②长江直接受东海强潮汐影响,其大潮、中潮、小潮潮型时的潮差分别达到2.60、1.80、0.80 m^[23],是石碛河区域潮汐强度的2倍以上;③长江感潮河段具有流量大、断面宽的特点,导致其潮流界对径流量变化的敏感性较低,变动范围仅为支流的0.86倍。这些因素共同作用,使得长江干流与支流在潮汐动力特征上表现出本质性差异。不同顶托水位条件下在临界潮径比处均达到径流作用绝对主导状态,低顶托水位临界潮径比为0.72,高顶托水位临界潮径比为0.18,相差较大,说明潮差增大对径流作用压制效应是非线性增强的。

4 结论

a. 基于石碛河实测流量和水位数据,建立了全河段水动力模型,设置了302组径流、潮差工况,研究了径潮耦合作用对潮流界位置的影响机制,并建立了适用于长江流域偏枯水年入江支流石碛河的潮流界位置经验公式。

b. 水位条件是影响潮流界分布的关键因素。低顶托水位条件下,潮汐为主要影响因素,越往上游潮汐作用越弱;高顶托水位条件下,潮流界变动范围明显缩小,受径流量、河道地形及分汊河道分布的制约,更集中于上游河段。

c. 在动力机制方面,径流量是影响潮流界迁移的主导因素。定量分析表明,当潮差恒定时,径流量每增加 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 可导致潮流界下移0~3.90 km;在径流量恒定时,潮差需要增加约7倍以上才能产生相当的位移,径流量在潮流界动态变化中起到决定性作用。随机工况的模拟分析结果表明,潮流界位置在不同顶托水位条件下均呈现典型的“阶梯状”分布特征,且主要集中于干支流交汇的断面,其中低顶托水位条件下占比达75%,高顶托水位条件下占比66.4%。高顶托水位条件下潮流界的变动范围更为宽广,最大可上溯至8.03 km处。

d. 利用潮径比表征径流作用与潮汐动力的相对强弱关系,分析结果表明,由于入江支流河道断面狭窄、水位坡降大、河口地形复杂等特点,其潮径比与潮流界位置的变化规律与长江干流对数型的变化规律存在明显差异。当潮径比达到临界值(低顶托水位条件下为0.72,高顶托水位条件下为0.18)时,径流作用占据绝对主导地位,此时潮流界位置趋于稳定。

参考文献:

[1] Becherer J, Burchard H, Flöser G, et al. Evidence of tidal straining in well-mixed channel flow from micro-structure

- observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17):L17611.
- [2] 刘鹏飞,路川藤,罗小峰,等. 基于数学模型的长江潮流界变化特性[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(3):346-353. (Liu Pengfei, Lu Chuanteng, Luo Xiaofeng, et al. Change characteristics of the Yangtze River based on mathematical model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(3):346-353. (in Chinese))
- [3] Hou Chengcheng, Zhu Jianrong, Huang Ju, et al. Quantitative relationships between the tidal current limit, tidal level limit and river discharge in the Changjiang River Estuary [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(11):1291.
- [4] 魏祥龙,陆卫安,唐洪武,等. 上海市感潮河网水质劣化机理研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41(5):319-328. (Wei Xianglong, Lu Wei'an, Tang Hongwu, et al. Study on the mechanisms of water quality deterioration in Shanghai City tidal river networks [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(5):319-328. (in Chinese))
- [5] 刘水芹,孙凤云,季永兴. 上海骨干河潮悬浮物时空分布及感潮影响分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(1):178-185. (Liu Shuiqin, Sun Fengyun, Ji Yongxing. Analysis of spatiotemporal distribution of suspended solids and its tidal influence in major rivers and lakes in Shanghai [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1):178-185. (in Chinese))
- [6] 罗亮,解超,蒋陈娟,等. 长江感潮河段径流对潮波变形和传播的影响研究[J]. *人民长江*, 2024, 55(1):6-13. (Luo Liang, Xie Chao, Jiang Chenjuan, et al. Influence of runoff on tidal wave deformation and propagation in tidal reaches of Changjiang River [J]. *Yangtze River*, 2024, 55(1):6-13. (in Chinese))
- [7] 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 Junhao, Cai Huayang, Yang Hao, et al. The evolution of estuarine backwater dynamics and its underlying mechanism: a case study of the Changjiang River Estuary [J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(12):31-41. (in Chinese))
- [8] 宋兰兰. 长江潮流界位置探讨[J]. *水文*, 2002, 22(5):25-26. (Song Lanlan. Research on the location of tidal current limit of Yangtze River [J]. *Journal of China Hydrology*, 2002, 22(5):25-26. (in Chinese))
- [9] 徐汉兴,樊连法,顾明杰. 对长江潮区界与潮流界的研究[J]. *水运工程*, 2012(6):15-20. (Xu Hanxing, Fan Lianfa, Gu Mingjie. On tidal mark and tidal current mark in the Yangtze River [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2012(6):15-20. (in Chinese))
- [10] 杨云平,郑金海,张明进,等. 长江下游潮流界变动段三益桥边滩与浅滩演变驱动机制分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4):502-513. (Yang Yunping, Zheng Jinhai, Zhang Mingjin, et al. Driving mechanism of Sanyiqiao point bar and shoal evolution in fluctuation segment of tidal current limit in lower reaches of Yangtze River [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4):502-513. (in Chinese))
- [11] Gusti G N N, Kawanisi K, Al Sawaf M B, et al. Investigating tidal river dynamics in a longitudinally varying channel geometry [J]. *Continental Shelf Research*, 2023, 253:104901.
- [12] Baar A W, Braat L, Parsons D R. Control of river discharge on large-scale estuary morphology [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(3):489-503.
- [13] 杜景龙,杨世伦,陈德超. 三峡工程对现代长江三角洲地貌演化影响的初步研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(5):489-495. (Du Jinglong, Yang Shilun, Chen Dechao. Preliminary study on the effect of Three Gorges Reservoir on the evolution of landform of the Yangtze Estuary delta [J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(5):489-495. (in Chinese))
- [14] Khadami F, Kawanisi K, Al Sawaf M B, et al. Spatiotemporal response of currents and mixing to the interaction of tides and river runoff in a mesotidal estuary [J]. *Ocean Science Journal*, 2022, 57(1):37-51.
- [15] 韩玉芳,路川藤,罗小峰,等. 长江潮流界变动段范围及其水动力特征[C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 舟山:中国海洋学会海洋工程分会, 2017:548-555.
- [16] 曾照洋,杨芳,吴小明,等. 珠海市横琴岛北部极端风暴与天文大潮不同遭遇情景下洪涝淹没规律研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41(4):42-50. (Zeng Zhaoyang, Yang Fang, Wu Xiaoming, et al. Study on flood and inundation law under different encounter scenarios of extreme storms and spring tides in northern part of Hengqin Island, Zhuhai City [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(4):42-50. (in Chinese))
- [17] 李明,李添雨,时宇,等. 基于 MIKE 耦合模型的人河污染模拟与控制效能研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(1):283-292. (Li Ming, Li Tianyu, Shi Yu, et al. Simulation of pollutant loads to rivers and control efficiency using a coupled MIKE SHE/MIKE 11 with ECO Lab system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1):283-292. (in Chinese))
- [18] 凌祺,李一平,程月,等. 感潮河流水动力水质周期性异质特征研究[J]. *环境科技*, 2025, 38(1):1-7. (Ling Zhen, Li Yiping, Cheng Yue, et al. Study on periodic spatiotemporal heterogeneity characteristics of hydrodynamics and water quality of tidal rivers [J]. *Environmental Science and Technology*, 2025, 38(1):1-7. (in Chinese))
- [19] Biswal S, Sahoo B, Jha M K, et al. A copula model of extracting DEM-based cross-sections for estimating ecological flow regimes in data-limited deltaic-branched river systems [J]. *Journal of Environmental Management*,

- 2023,342:118095.
- [20] 王海森,冯岚,李百炼,等.基于MIKE 11的河网区域小型闸坝调控的水质响应模拟研究[J].环境科学学报,2022,42(8):314-324.(Wang Haisen, Feng Lan, Li Bailian, et al. Water quality response to regulation of small floodgates in river network region of Wuxi based on MIKE 11 model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42 (8):314-324. (in Chinese))
- [21] 李建新,刘小生,刘静,等.基于MRMR-HK-SVM模型的PM_{2.5}浓度预测[J].中国环境科学,2019,39(6):2304-2310.(Li Jianxin, Liu Xiaosheng, Liu Jing, et al. Prediction of PM_{2.5} concentration based on MRMR-HK-SVM model [J]. China Environmental Science, 2019, 39 (6):2304-2310. (in Chinese))
- [22] 常留红,薛雄,郭洋,等.基于SWMM的污水管网外来水量入渗反演识别研究[J].水资源保护,2024,40(5):141-147.(Chang Liuhong, Xue Xiong, Guo Yang, et al. Study on identification and inversion of external water leakage in sewage pipeline network based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 141-147. (in Chinese))
- [23] 朱巧云,杨海飞,钱传俊.径潮流变化对长江潮流界位置的影响研究[J].海洋通报,2021,40(5):502-511.(Zhu Qiaoyun, Yang Haifei, Qian Chuanjun. A study of river-ocean's impacts on tidal current limit in the Changjiang River [J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40 (5):502-511. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 夏厚兴,付开雄,陈能志,等.闽江下游干流水流运动变化数值模拟分析[J/OL].中国农村水利水电,1-12 [2025-10-30]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.tv.20251017.1147.019>. (Xia Houxing, Fu Kaixiong, Chen Nengzhi, et al. Numerical simulation analysis of flow movement changes in the mainstream of the Lower Min River [J/OL]. China Rural Water and Hydropower, 1-12 [2025-10-30]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.tv.20251017.1147.019>. (in Chinese))
- [26] 冯宇泽,郭磊城,马慧晨.长江河口潮汐特征的年内变化分析[J].海洋通报,2022,41(5):537-547.(Feng Yuze, Guo Leicheng, Ma Huichen. Analysis on the monthly change of the tidal wave characteristics in the Changjiang River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2022, 41 (5): 537-547. (in Chinese))
- [27] 韩雪梅,吴红斌,周刚,等.基于弯道二次流修正模型的大辽河潮流界时空变化模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):19-25.(Han Xuemei, Wu Hongbin, Zhou Gang, et al. Spatio-temporal characteristics of tidal limit and tidal current limit of Daliaohe River based on a modified model [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15 (3): 19-25. (in Chinese))
- [28] 周正道,黄斌,普祥和,等.水位-流量关系曲线拟合方法对比分析[J].中国防汛抗旱,2025,35(12):98-102.(Zhou Zhengdao, Huang Bin, Pu Xianghe, et al. Comparative analysis of fitting methods for water level and flow relationship curve [J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35 (12): 98-102. (in Chinese))
- [29] 侯成程,朱建荣.长江河口潮流界与径流量定量关系研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),2013(5):18-26.(Hou Chengcheng, Zhu Jianrong. Study on the quantitative relationship of the location of the tidal current limit and the river discharge in the Changjiang Estuary [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2013 (5): 18-26. (in Chinese))
- [30] Iglesias I, Bio A, Bastos L, et al. Estuarine hydrodynamic patterns and hydrokinetic energy production: the Douro estuary case study [J]. Energy, 2021, 222: 119972.
- [31] Cheng Bingfen, Zhang Yuan, Xia Rui, et al. Backwater makes the tributaries of large river becoming phosphorus "sink" [J]. Water Research, 2024, 261: 122012.
- [32] 钟子悦,向波,余明辉,等.伶仃洋河口枯季径-潮-盐-悬沙动力特征对海床地形异变响应[J].水利学报,2025,56(4):477-487.(Zhong Ziyue, Xiang Bo, Yu Minghui, et al. Response of river-tide-salt-suspended sediment dynamics to seabed topographic abnormality during dry season in the Lingdingyang Bay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56 (4): 477-487. (in Chinese))
- [32] Feng Zhiyong, Tan Guangming, Xia Junqiang. Sediment transport capacity under the river-tide interaction in the Changjiang Estuary [J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(2):207-218.
- [33] Zhang Xingnong, Chen Changying, Jia Dongdong. Characteristics of cross sections and dynamic factors of bed forming in the lower tidal reach of the Yangtze River [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts, APAC 2019. Hanoi, Vietnam: Springer, 2020: 635-640.
- [34] 牛文静,王正华,冯志州,等.长江上游梯级水库群防洪库容互用方式研究[J].水利学报,2025,56(7):874-884.(Niu Wenjing, Wang Zhenghua, Feng Zhizhou, et al. Research on the interoperability of flood control reservoir capacity in the cascade reservoir group of the upper Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56 (7): 874-884. (in Chinese))
- [35] Zhang Fanyi, Lin Binliang, Sun Jian. Current reversals in a large tidal river [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 223: 74-84.