

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0168

戴文鸿, 胡涛, 丁梦娇, 等. 感潮河段交汇区水流特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 171-177. DAI W H, HU T, DING M J, et al. Numerical simulation of flow characteristics in a tidal river confluence[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 171-177. (in Chinese)

感潮河段交汇区水流特性数值模拟

——以宁波三江口为例

戴文鸿^{1,2,3}, 胡涛¹, 梦娇¹, 谢谦城¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;
3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 河流交汇为城市的发展提供了便利, 对区域防洪、航运及河道演变影响重大。针对感潮河段交汇区域特有的非恒定往复流条件, 以宁波三江口为例, 运用 Delft-3D 建立二维水动力数学模型。基于实测水文和地形资料, 引入四种评估参数对模型进行了率定与验证。重点分析了洪、枯两季涨、落急时刻, 交汇区流速分布及水面形态等水流特性。结果表明: 涨潮时, 交汇区流场可类比分叉水流; 落潮时, 则为交汇水流; 交汇区顶点及左支入汇侧下游存在两个低流速区, 并可形成分离区; 汇流区流速整体呈落潮大于涨潮的趋势, 洪、枯季间最大流速相近。此外, 涨、落急时刻典型特征断面水面呈单一横比降, 且落急时刻比降明显大于涨急时刻; 落急时, 交汇口水面呈混合层附近高, 两侧低的“马鞍形”分布。

关键词: 感潮河段; 交汇水流; 数值模拟; 流速分布; 水面形态; Delft 3D

中图分类号: TV 14 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical simulation of flow characteristics in a tidal river confluence

—A case study of Sanjiangkou in Ningbo City

DAI Wenhong^{1,2,3}, HU Tao¹, DING Mengjiao¹, XIE Qiancheng¹

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

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: River confluence provides convenience for the development of cities and has significant influence on the region's flood control, inland navigation, and fluvial processes. Aiming at the unidirectional flows in a tidal river confluence (Sanjiangkou, Ningbo city), we established a two-dimensional hydrodynamic mathematical model using Delft 3D. Based on the measured hydrological and topographic data, we applied four commonly used parameters to calibrate and validate the model results, focusing on such flow characteristics as the tidal current fields, velocity distribution and horizontal water level changes at the maxi-

收稿日期: 2018-06-22 修回日期: 2018-08-22 网络出版时间: 2018-09-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180926.1751.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402501); 国家自然科学基金(51479071); 高等学校学科创新引智计划(B12032; B17015); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(3014SYS1401)

Funds: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0402501); National Natural Science Foundation of China (51479071); Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B12032; B17015); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (3014SYS1401)

作者简介: 戴文鸿(1966), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 主要从事河流水沙运动、河流演变与模拟、河流泥沙工程等方面研究工作。E-mail: wdai@hhu.edu.cn

imum flood and ebb tides in wet and dry seasons. The results showed that the flow field in the confluence area is analogous to the distributary flow during the flood tide, and is the confluence flow during the ebb tide. There are two low velocity regions in the confluence vertex and the downstream of the left branch confluence area and they can form a separation region. The confluence flow velocity during the ebb tide is generally larger than that during the flood tide. The maximum flow velocities in the wet and dry seasons are close. In addition, the water surface of the three typical cross sections shows a single transverse slope during the maximum flood and ebb tides. the water surface slope at the maximum ebb tide is greater than that at the maximum flood tide. At the maximum ebb tide, the water surface of the confluence area is high near the mixed layer and low at its two sides, showing a "saddle shape".

Key words: tidal river; confluence flow; numerical simulation; velocity distribution; water surface pattern; Delft 3D

平原河网地区水系纵横交错,水流交汇现象普遍存在。交汇区因其独特的床面形态及水流条件等差异,长期是水力学学科研究的重点及难点。自 Taylor^[1]于 1944 年分别以 45°、135° 等宽明渠交汇为例,推导出了基于上游支流与下游汇流水深比与流量比之间的关系以来,许多学者就汇流区水流特性展开了相关研究。Best 等^[2]通过研究水流交汇区的水流特性,提出了交汇区的概化模型,将其依据各自水力特性分为停滞区、偏离区、分离区、最大流速区、水流恢复区及剪切层区,为后续研究提供了便利。De Serres 等^[3]通过原型观测,分析了交汇区的实测流场,认为交汇区顶点出现停滞区,交汇口中部流速较两岸低;Biron 等^[4]对交汇口的水面形态展开了详细的研究,发现在交汇口的停滞区及剪切层附近,水面较高并向两侧倾斜。此外,随着计算机技术的发展与数值求解格式的进步,数学模型逐渐被运用到交汇流的研究中,如赵升伟等^[5]分别应用水深平均 H-L 模型及 k-ε 模型建立了二维数值模型,并通过与实测资料对比,证明了数值模型的可行性;王协康等^[6]采用水气两相流三维数值模型,就嘉陵江与长江交汇口处的流速特性展开了细致的研究;张琦等^[7]通过数值模型对交汇区的水面形态及流速分布进行了研究,结果表明支流的平面形状对交汇口的水面形态及流速分布有较大影响;冯亚辉^[8]模拟研

究了 Y 型交汇河道在不同交汇角时,交汇口下游的水面横向形态,发现当交汇角小于 60° 时,水面横向呈单一比降;当交汇角大于 90° 时,水面横向形态呈现出凸脊形;周苏芬等^[9]运用 SMS 建立了二维水动力数值模型,研究了嘉陵江与长江交汇区在不同汇流比下,水位、水面比降及床面切应力的变化。

综上,目前大多数有关交汇区的研究均在单向流条件下进行^[10-12],并且以矩形水槽、小宽深比情况为主^[13-14],而对潮汐条件下,同时受径流和潮流影响的水流特性研究相对较少^[15]。同时,因室内实验与天然情况的区别,导致部分实验研究规律与天然情况存在较大差异^[16];原型观测则受限条件较多,开展具体研究相对困难。为此,本文以宁波三江口为例,基于实测水文和地形数据,就受往复流影响下的感潮河段交汇区水流特性进行了模拟研究,初步揭示了洪枯两季大潮条件下,涨、落急时刻的汇流口流场和水位特征及变化规律,可为天然感潮河段交汇区防洪规划、航运交通及相关科研提供参考。

1 研究河段概况

甬江流域位于浙江省东部沿海,南源奉化江,北源姚江,于宁波三江口交汇后称甬江,俗称“三江河道”(见图 1)。其作为典型汇流河道,自然地理条件独特,姚江在入汇段河宽束窄并以反向弯的形式入

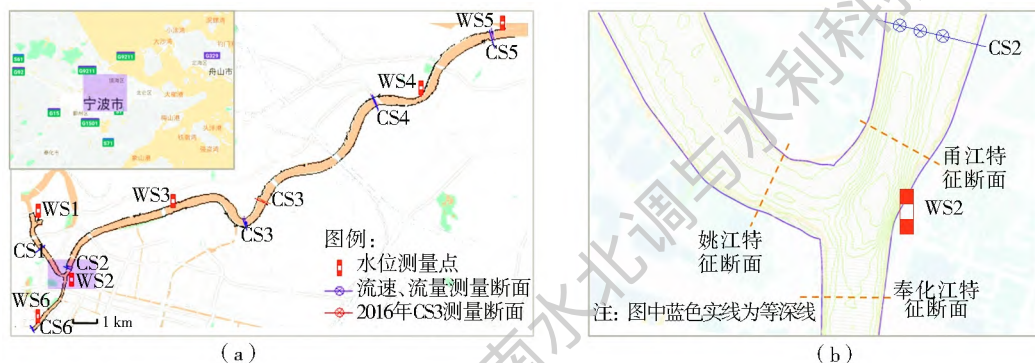


图 1 研究区域与水文量测断面位置示意图

Fig. 1 The location of the study area and the layout of the observation stations for water levels (WS) and flow velocity (CS)

汇, 交汇角约为 90° ; 而奉化江在入汇段渐扩, 基本是直线过渡到甬江; 交汇后甬江向东延伸约 25.6 km 流入东海。上述河段均是感潮河段, 海水与淡水相互交替, 以河道径流和海洋潮流的相互作用为主。

2 模型的建立与验证

Deltares(荷兰三角洲研究所)开发的 Delft-3D 模型程序能够模拟二维和三维的水流、波浪、水质、生态、泥沙输移及床底地貌, 以及各个过程之间的相互作用, 是目前国际上最为先进的水动力-水质模型之一。本文主要采用其中的 Flow 模块对交汇口水流特性进行模拟研究。

2.1 模型的建立

水流模块 Delft3D-Flow 采用交错四边形网格, 通过 ADI 法进行离散, 兼具显式和隐式格式的优点, 计算稳定且精度高。在正交曲线坐标下, 二维水流运动的基本方程包括连续性方程和动量守恒方程, 即:

(1) 连续性方程。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_\xi} \sqrt{G_\eta}} \frac{\partial [H U \sqrt{G_\eta}] + \frac{1}{\sqrt{G_\xi} \sqrt{G_\eta}} \frac{\partial [H V \sqrt{G_\xi}]}{\partial \eta} = Q \quad (1)$$

(2) 动量方程。

ξ 方向的动量方程, 即:

$$\frac{u}{\sqrt{G_\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_\xi} \sqrt{G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\eta}}{\partial \xi} + \frac{w^2}{\sqrt{G_\xi} \sqrt{G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\xi}}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f v = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_\xi}{\partial \xi} + F_\xi + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \quad (2)$$

η 方向动量方程, 即

$$\frac{u}{\sqrt{G_\xi}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_\eta}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{\sqrt{G_\xi} \sqrt{G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\xi}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_\xi} \sqrt{G_\eta}} \frac{\partial \sqrt{G_\xi}}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - f u = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_\eta}{\partial \eta} + F_\eta + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \quad (3)$$

式中: t 为时间; ξ, η 为正交曲线坐标; $\sqrt{G_\xi}$ 和 $\sqrt{G_\eta}$ 为正交曲线坐标系中的拉梅系数; Q 为单位面积上的水量变化率; u, v 对应 ξ, η 方向上的流体速度; $f = 2\Omega \sin \phi$ 是科氏力系数 (Ω 是地球自转角速度; ϕ 是计算水域所在纬度; ρ 是流体密度; ν_v 是垂向涡黏滞系数; P_ξ, P_η 表示 ξ, η 方向上的压力梯度; F_ξ, F_η 表示 ξ, η 方向上的水平紊动雷诺应力; M_ξ 和 M_η 分别是 ξ 和 η 方向上外来动量的源或汇。

本文数学模型模拟范围为: 姚江自姚江闸下 (WS1) 至三江口约 3.3 km, 奉化江自澄浪堰 (CS6) 至三江口约 3.5 km, 甬江自三江口 (WS2) 至镇海口 (WS5) 约 25.6 km。计算模拟区域采用 1954 年北京坐标系, 有效网格总数约为 23 000, 网格长度在 5~45 m 之间, 交汇口区域网格加密至 5~10 m 之间。地形根据实测高程点插值得到。模型给定非恒定流边界条件, 上游为两支流的流量时间序列, 下游为镇海口潮位的时间序列。河床糙率参考相关研究成果, 经 2010 年水文资料率定, 确定模型糙率值为 0.015~0.025。

2.2 模型的验证

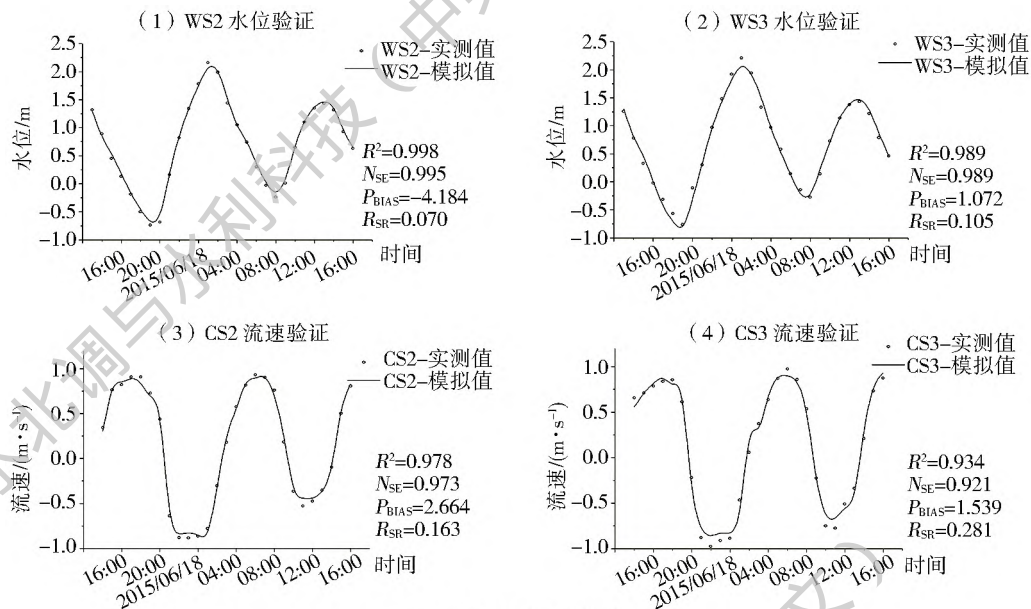
采用 2015 年 6 月和 2016 年 1 月实测洪、枯季大潮水文资料对模型进行验证 (图 2), 为确保非恒定流条件下所建模型的准确性, 除对比水位、垂线平均流速的模拟值与实测值外, 同时引入四种数值模拟的评估参数^[17-18] (表 1), 对计算结果进行对比分析。结果表明模拟值与实测值之间的相位误差在 0.20 h 以内, 且潮位、流速模拟值与实测值吻合较好。

表 1 模型验证评估参数

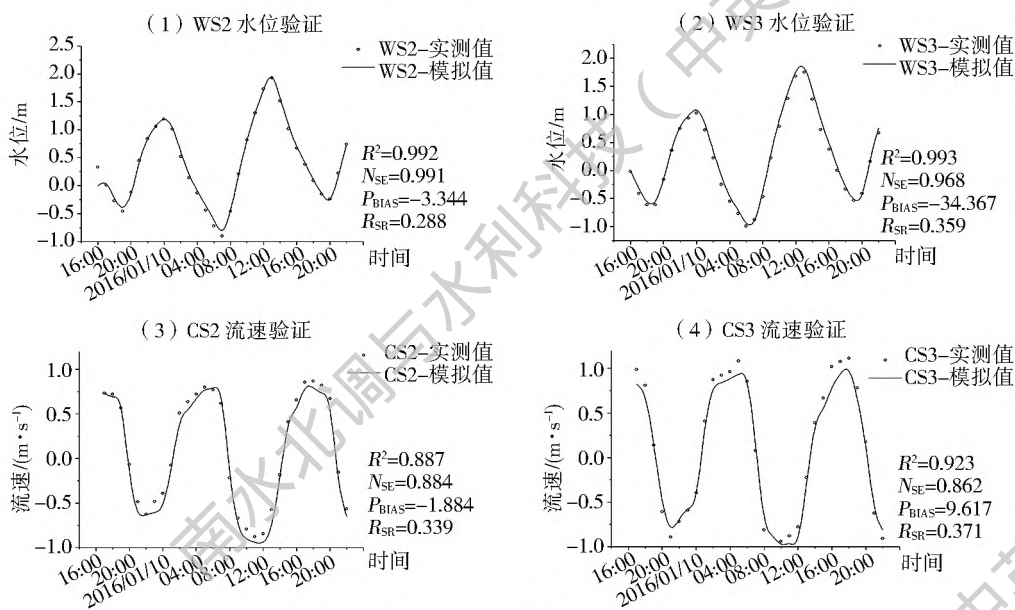
Tab. 1 Model validation assessment parameters

参数	范围	理想值	允许偏差范围	计算公式
均方差 R^2	0~1	1	> 0.5	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \right)^2 \quad (4)$
纳什效率系数 N_{SE}	$-\infty \sim 1$	1	> 0.5	$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (5)$
偏差系数 P_{BIAS}	$-\infty \sim \infty$	0	$\pm 25\%$	$P_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (6)$
标准差系数 R_{SR}	0~ ∞	0	≤ 0.7	$R_{SR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}} \quad (7)$

表 1 公式中 O 为实测值; P 为计算值; \bar{O} 为平均实测值; \bar{P} 为平均计算值; n 为计算总数; 流速正值表示水流沿落潮方向。模型各具体评估参数计算值见图 2。



(a) 2015年6月洪季大潮验证



(b) 2016年1月枯季大潮验证

图 2 洪、枯两季大潮水位、流速验证

Fig. 2 Verification of the water level and flow velocity in the wet and dry seasons

3 模型计算结果及分析

3.1 典型潮流场分析

天然河道的水流交汇可沿主流方向分为近区与远区两个区域^[19], 相对与远区而言, 近区又可进一步分为分离区和过渡区两个区域, 为更加直观的呈现交汇区涨落潮的水流特点, 图 3 分别描述了 2015 年洪季大潮及 2016 年枯季大潮三江口近区涨、落急流速场。

涨潮时, 随着外海水位抬升, 海水顺甬江溯源而上, 在三江口分为两股, 一股继西南方向涌入奉化江, 另一股转向西北进入姚江。在图 3(a) 中, 此时流场可类比分叉水流, 其表面水流流速整体过渡平顺, 交汇区水流流速较周围区域小。甬江最大流速值出现在交汇区下游, 最大值约 0.8~0.9 m/s; 奉化江最大流速出现在河道中部偏左, 约 0.7~0.8 m/s; 姚江整体流速偏小, 受弯曲河道影响其最大流速靠近凹岸, 约 0.6 m/s。枯季大潮涨急时, 其流速分布及变化规律与洪季类似, 近区最大流速值与洪季接近。

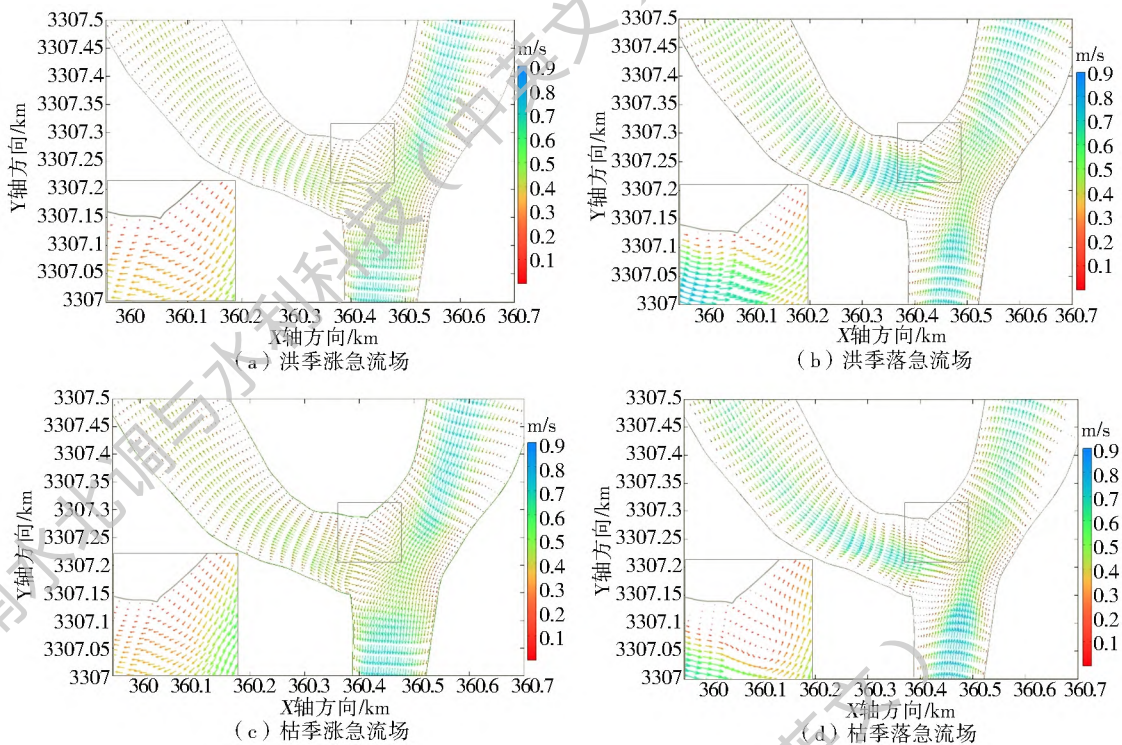


图3 交汇区洪、枯两季大潮涨急、落急时刻流场图

Fig. 3 Tidal current fields at the maximum flood and ebb tides in the wet and dry seasons

落潮时,随着外海水位降低,甬江水面回落,姚江水流经反向弯后与奉化江来流一同汇入甬江。在图3(b)中,两股水流在交汇区碰撞,水流流向发生偏移,姚江因水流动量较小,在奉化江水流的挤压与弯曲边界共同作用下,流线向左岸偏移明显。与此同时,三江口交汇区受姚江来流的顶托作用,主流产生相对的侧向位移,过流断面被压缩,导致落急时交汇口最大流速位置较涨急偏右,并在交汇区顶点及姚江入汇下游两侧存在两个低流速区。因两季落急水位、流量影响,枯季低流速区范围大于洪季。混合层源自顶点低流速区,其附近流速较低,随着向下游发展流速逐渐增大,并在过渡区逐渐恢复,分析原因受交汇河流河床高差的影响,当交汇点附近水流掺混时,水流结构更加复杂,水流紊动增强,能量耗散加剧,使得混合层附近流速较低。下游低流速区位于分离区位置,主要受平面形态及水力条件限制,并在枯季大潮时发展形成分离区,进一步压缩了三江口下游的过水断面,并会对泥沙及含有物质输移、渠道冲刷等产生重要影响^[20],见图3(d)。

对比洪、枯两季涨落急流场图可知,甬江河道横断面流速梯度涨潮较落潮时大,而奉化江及姚江则相反,说明水流在分叉、交汇时,在对应时刻下游河道中存在恢复区,流速发生重分布;且由于潮流的落潮量较涨潮量大,河道整体流速呈落急大于涨急的态势,但洪、枯两季间涨落急流速相近。

3.2 交汇口水面形态分析

为进一步探究感潮河段交汇区附近水面形态的变化规律,本节分别就2015年、2016年洪、枯两季涨、落急时刻为例,对交汇口上下游各特征断面横向水位展开研究,相应特征断面布置见图1(b)。

在图4(a)中,涨急时刻,甬江特征断面整体水位最高,水流涌入奉化江及姚江,可视为分叉水流,受河道平面形态的影响,甬江及姚江特征断面水位左低右高,且姚江特征断面水面横比降受弯段影响较甬江更大;奉化江特征断面水面成左高右低的态势,水面横比较较小,主要因为涨潮流在涌入汇流口时,受地形约束,主流偏奉化江左岸(姚江右岸),并在交汇区上游顶点附近产生壅水,这也是造成姚江、奉化江水面呈单一横比降的原因;此外,姚江受弯段的影响,水面比降较大。枯季大潮时,相应特征断面水位变化趋势与洪季类似,但水面横比降略有增大。

落急时刻,甬江特征断面整体水位最低,奉化江及姚江来水交汇流入甬江。从图4(b)中可知,落急时,甬江及姚江特征断面水位仍呈左低右高的单一横比降,而奉化江则相反,但上述特征断面水位横比降较涨潮时有明显增加;而在交汇区(见图5),水面形态则呈混合层附近水位高,并向姚江左岸及奉化江右岸降低的“马鞍型”。分析原因为奉化江来流受姚江水流的顶托作用,在交界面因剧烈的掺混与紊动抬高了混合层附近水位,根据连续性原理,进而提

升了奉化江及姚江的水面比降,使姚江与奉化江河道特征断面水位呈混合层一侧高的单一比降;甬江则因姚江的顶托作用,奉化江主流向右岸偏移,呈分

离区水位低,对岸水位高的单一横比降。枯季大潮时,受姚江来流增大影响,顶托作用增加,奉化江主流偏移加剧,致使奉化江特征断面比降明显增强。

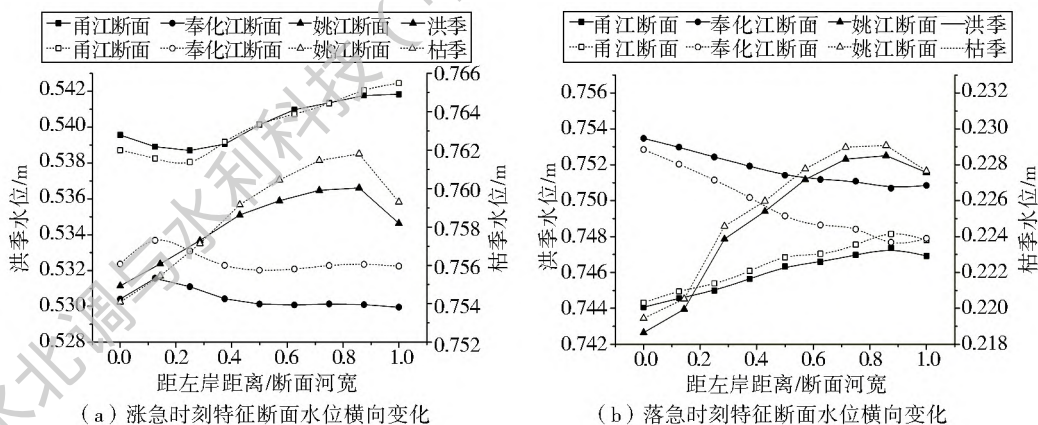


图 4 交汇区洪、枯两季大潮涨、落急时刻特征断面水位横向变化图

Fig. 4 Transversal changes of water level at the maximum flood and ebb tides in the wet and dry seasons

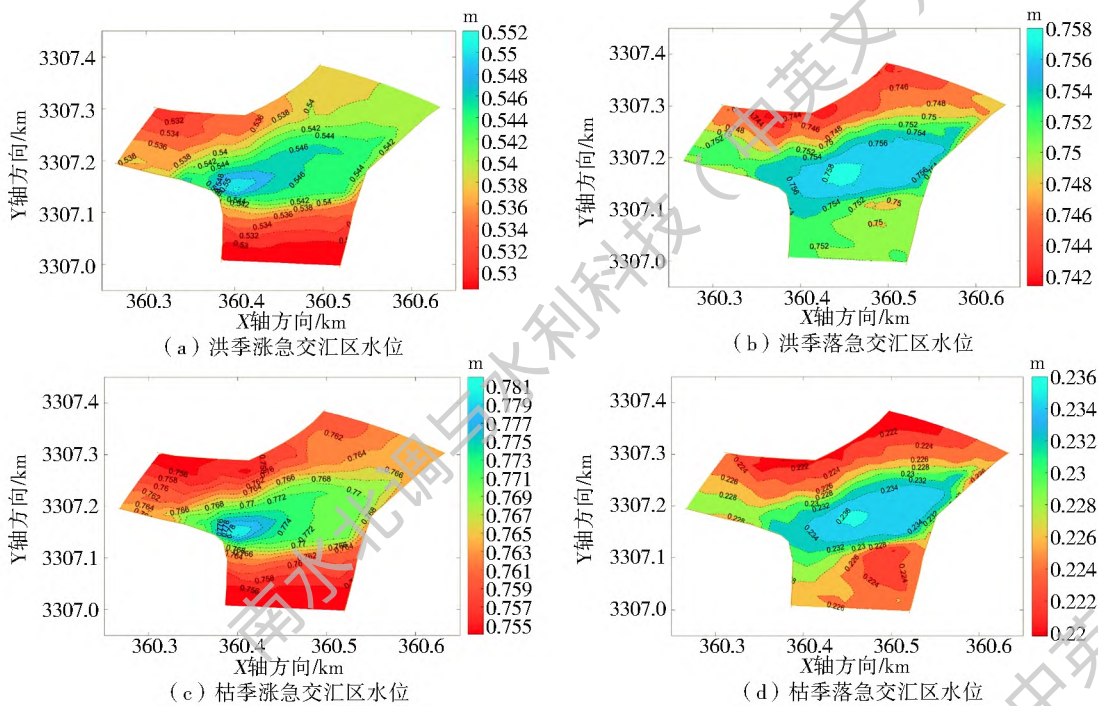


图 5 交汇区洪、枯两季大潮涨、落急时刻水位分布

Fig. 5 Water level distributions at the maximum flood and ebb tides in the wet and dry seasons

总体来看,对比洪、枯两季涨落急时刻特征断面水位可知,洪、枯两季大潮时相应特征断面水位变化趋势类似,即涨、落急时,甬江、奉化江水位左高右低,姚江右高左低,但相比于涨急,落急时刻因水流顶托作用,水面横比降明显增大。

4 结论

感潮河道的水流交汇受潮汐往复流的影响,使交汇区流场、水面形态变化更加复杂。本文以宁波三江口为例,基于实测资料对数值模拟结果进行了验证,着重分析了交汇区洪枯两季大潮涨、落急时刻

的流场、水面形态等特性,得出如下结论。

(1) 涨潮时,三江口流场可类比分叉水流,其整体流速过渡平顺,流经交汇区时减少,分别涌入姚江及奉化江后流速增加;落潮时,两股水流交汇,水流流向发生偏移,并在交汇区顶点及姚江入汇口下游形成低流速区或分离区;甬江河道横断面流速梯度涨潮较落潮时大,而奉化江及姚江则相反,说明水流在分叉、交汇时,对应时刻下游河道流速发生重分布,可视作恢复区。

(2) 洪枯两季大潮相应时刻三江口流速分布类似,受上流径流条件影响,整体呈落潮流速大于涨潮

流速的趋势,但洪、枯季间涨、落急最大流速相近。

(3) 洪枯两季大潮时相应特征断面水面形态变化趋势类似,均为单一横比降:姚江、奉化江呈混合层一侧高,对岸水位低;甬江呈分离区较低,对岸水位高;受交汇水流顶托作用,落急时刻较涨急时刻的水面横比降明显增加。交汇口处水面落急时受上游低流速区影响,呈混合层附近高,两侧低的“马鞍形”。

参考文献(References):

- [1] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open channel junctions[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 109(1): 893-902.
- [2] BEST J L. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology[M]. Recent Developments in Fluvial Sedimentology, 1987: 27-35. DOI: 10.2110/pec.87.39.0027.
- [3] DE SERRES B, ROY A G, BIRON P M, et al. Three-dimensional structure of flow at a confluence of river channels with discordant beds[J]. Geomorphology, 1999, 26(4): 313-335. DOI: 10.1016/S0169-555X(98)00064-6.
- [4] BIRON P M, RICHER A, KIRKBRIDE A D, et al. Spatial patterns of water surface topography at a river confluence[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(9): 913-928. DOI: 10.1002/esp.359.
- [5] 赵升伟, 茅泽育, 罗日升, 等. 等宽明渠交汇水流数值计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 494-499. (ZHAO S W, MAO Y Z, LUO R S, et al. Depth averaged turbulence models for flow simulation at equal width open channel junction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(5): 494-499. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.2005.05.003.
- [6] 王协康, 周苏芬, 叶龙, 等. 长江与嘉陵江交汇区水流结构的数值模拟[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 372-377. (WANG X K, ZHOU S F, YE L, et al. Numerical simulation of confluence flow structure between Jialing River and Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 372-377. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.009.
- [7] 张琦, 丁全林, 钱乐乐, 等. 交汇口支流水动力特性数值模拟研究[J]. 人民长江, 2017, 48(11): 101-106. (ZHANG Q, DING Q L, QIAN L L, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics at tributary confluence[J]. Yangtze River, 2017, 48(11): 101-106. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.11.021.
- [8] 冯亚辉, 李书友, 郭维东. Y形交汇口水面形态特征的数值分析[J]. 人民长江, 2008, 39(16): 63-66. (FENG Y H, LI S Y, GUO W D. Numerical analysis of water surface characteristics at the confluence of a Y-type channel[J]. Yangtze River, 2008, 39(16): 63-66. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2008.16.022.
- [9] 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 effects 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. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2014.s1.002.
- [10] XIAO Y, XIA Y, YUAN S Y, et al. Flow structure and phosphorus adsorption in bed sediment at a 90° channel confluence[J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(5): 902-905. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60804-1.
- [11] SUKHODOLOV A N, KRICK J, SUKHODOLOVA T A, et al. Turbulent flow structure at a discordant river confluence: Asymmetric jet dynamics with implications for channel morphology[J]. Journal of Geophysical Research, 2017, 122: 1278-1293. DOI: 10.1002/2016JF004126.
- [12] 张挺, 许唯临, 伍平, 等. 90°明渠交汇口三维水力特性数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 52-59. (ZHANG T, XU W L, WU P, et al. Numerical simulation of three-dimensional characteristics of flow at 90° open channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 52-59. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2009.01.008.
- [13] SCHINDFESSEL L, CREPELLE S, DE MULDER T. How different cross-sectional shapes influence the separation zone of an open channel confluence[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(9): 04017036. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001336.
- [14] YUAN S, TANG H, XIAO Y, et al. Turbulent flow structure at a 90-degree open channel confluence: Accounting for the distortion of the shear layer[J]. Journal of Hydroenvironment Research, 2016, 12: 130-147. DOI: 10.1016/j.jher.2016.05.006.
- [15] MAANEN B V, COCO G, BRYAN K R. Modelling the effects of tidal range and initial bathymetry on the morphological evolution of tidal embayments[J]. Geomorphology, 2013, 191(7): 23-34. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.02.023.
- [16] 王晓刚. 汇流口水流水力特性研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2007(10): 82-86. (WANG X G. Summary of Study on Hydraulic Characteristics of Channel Confluences[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(10): 82-86. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2007.10.024.
- [17] MORIASI D N. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153.
- [18] KRAUSE P, BOYLE D P, BENSE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment[J]. Advances in Geosciences, 2005, 5(5): 89-97. DOI: 10.5194/adge05892005.
- [19] 岳志远, 刘怀汉, 李有为, 等. 明渠交汇口水流浅水二维数学模型研究[J]. 水运工程, 2012(10): 74-76. (YUE Z Y, LIU H H, LI Y W, et al. Shallow water two-dimensional numerical simulation of open channel inflow[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(10): 74-76. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2012.10.014.
- [20] 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(2): 1-7. (MAO Z Y, ZHAO S W, ZHANG L, et al. Experimental study on 3D flow characteristics at the confluence of open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(2): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2004.02.001.