

甬舟航道潮汐潮流的数值模拟及特征分析

彭腾腾, 纪棋严, 刘宇, 张洁, 孙永钊, 苏毓, 尹颐宸

(浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 266061)

摘要: 基于非结构网格有限体积海岸海洋模型(FVCOM),建立了甬舟航道(121.78°~122.5°E, 29.7°~30.1°N)及其附近海域的三维潮汐潮流数值模型。模拟结果同4个验潮站和2个连续测流站的观测资料吻合良好,表明该模型可以较好地反映甬舟航道海域内潮汐潮流的分布特征和变化规律。该航道海域的潮汐类型为不规则半日潮,最大可能潮差介于4.5~4.7 m之间;潮流类型为规则半日潮流,主要为往复流,只有航道岸边少部分表现为旋转流。最大可能流速分布在狭窄的深水道,而航道水深较浅的岸边流速较小。潮致余流介于1~15 cm/s,大致方向由东南向西北传播,并且在航道的西北和东南两侧分别形成两个明显的闭合环流。

关键词: FVCOM; 甬舟航道; 潮汐潮流

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)03-0094-13

1 引言

甬舟航道位于浙江沿海北部公共航路的西航路的最南端。该航道不仅承担了宁波-舟山港(全国第一大港)大部分的水上运输交通路线,还是浙江沿海北部西航路的必经之地。为了保障航道通畅并减少泥沙淤积造成的损失,应当对航道及其海域的水动力环境特征有充分的了解和认识。甬舟航道及周边海域的水动力环境主要受潮汐动力影响,但该区域面积相对狭窄,岸线曲折,岛屿众多,潮汐潮流较为复杂。稀疏的观测数据无法全面研究该航道的潮汐潮流变化规律,因此开展该航道海域潮汐潮流等水动力数值模拟对保障航道通行和泥沙疏浚等具有重要意义。

非结构网格有限体积海岸海洋模型(Finite Volume Coastal Ocean Model, FVCOM)已经广泛应用于海洋研究领域,其非结构三角形网格能较好地拟合曲折复杂的岸线,而且可以针对重点区域进行局部加密。蒋志婷^[1]、寿玮玮^[2]、熊伟等^[3]和安佰

超^[4]都对舟山宁波周边海域的潮汐潮流进行了数值模拟分析,但是他们关注舟山群岛外围的潮汐潮流变化规律,而且验证潮位数据的站点位置较偏离本文研究的航道。本文基于FVCOM海洋数值模式,采用非结构的三角形网格和高精度水深数据,对甬舟航道及其周边水域进行了三维潮汐潮流水动力区域数值模拟。基于验证良好的数值模拟结果,分析甬舟航道及周边海域的潮汐潮流和潮余流特征,掌握潮汐潮流的变化规律。本文数值模型的建立,为研究甬舟航道泥沙冲淤特征及影响奠定基础,也将有助于船只通航及周边海域的海上作业,为进一步研究宁波舟山港口和航道的潮汐潮流并建立可靠的预报系统提供重要参考。

2 模型建立

2.1 FVCOM模式介绍

目前,FVCOM模式在海洋研究领域应用比较广泛,其在水平方向上采用非结构三角形网格能更

收稿日期: 2021-04-26; 修回日期: 2021-07-30。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41806004); 国家重点研发计划(2016YFC1401605); 浙江省基础公益研究计划(LGF22D060001)。

作者简介: 彭腾腾(1996-),男,硕士在读,主要从事潮汐波动力学方面研究。E-mail: 2825443328@qq.com

通讯作者: 纪棋严(1986-),男,讲师,博士,主要从事近岸海洋数值模拟与资料同化方面研究。E-mail: jiqiyan@zjou.edu.cn

好地拟合复杂曲折的海岸区域,垂直方向上采用 σ 坐标能较好地贴合水下复杂地形^[5]。该模式在求解过程中,采用有限体积法和三维原始方程等方法解决复杂沿海岸线拟合问题。另外,考虑到干湿边界的变化对潮汐的传播造成的影响,该模式采用干湿判别法,可以较好地模拟出海水涨潮和落潮期间滩涂被淹没或露出的情况,提高潮汐模拟的准确度。综合考虑甬舟航道的岸线曲折、水底地形复杂以及水动力复杂等环境特点,采用FVCOM模式进行数值模拟对甬舟航道是非常适合的。

2.2 模型配置

模型计算的经纬度范围为 $120^{\circ}\sim 124.7^{\circ}\text{E}$, $28.5^{\circ}\sim 32.4^{\circ}\text{N}$ 。水平方向上采用不重叠的非结构三角形网格,对甬舟航道海域以及周边的岸线区域进行了加密处理,最小网格分辨率约为40 m,开边界的平均网格分辨率约为11 km,无结构三角形单元总数为83 548个,网格节点总数为43 398个(见图1);垂直方向采用 σ 坐标,分为等间隔的10层;时间步长为2.0 s;底摩擦系数设为0.002 5;模型使用的水深资料为中华人民共和国海事局最新海图,数据覆盖整个模型范围。

本文采用OTPS资料集制作的潮汐调和常数作为模式开边界的潮汐初始驱动,主要考虑 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 和 Q_1 这8个主要分潮。

模型温盐设为常数(不考虑温度和盐度的时空变化,即正压模式);设置流速及水位的初始场皆为0;不考虑河流的径流输入和大气强迫作用;模式运行时间段为2020年1月1日00:00—12月31日23:00。

3 模拟结果验证

为验证模拟结果,潮汐观测数据使用镇海(T1)、六横台门(T2)、六横(T3)和金塘(T4)4个临时潮位观测站监测的水位数据(见图1,红色三角形为站点位置),观测时间为同一时间段,潮位观测数据情况如表1所示;潮流观测数据采用2号浮标一周潮流数据以及金塘3#站点的大潮和小潮时期的潮流数据,观测时间和层次如表1所示。

3.1 潮汐结果验证

从模式中取4个验潮站位置对应时间段的模拟数据进行调和分析,获得 M_2 、 K_1 、 S_2 和 O_1 分潮的调和常数,把4个分潮的调和常数与验潮站的调和常数进行验证对比与误差分析,结果见表2。对比分析表明模型在4个站点位置的模拟调和常数与实际调和常数比较吻合,4个分潮振幅的平均绝对误差分别为2.9 cm、2.55 cm、1.8 cm和1.6 cm,迟角的平均绝对误差分别为 4.47° 、 3.17° 、 1.55° 和 5.80° 。

将对应站点位置的模式模拟潮位与镇海(T1)

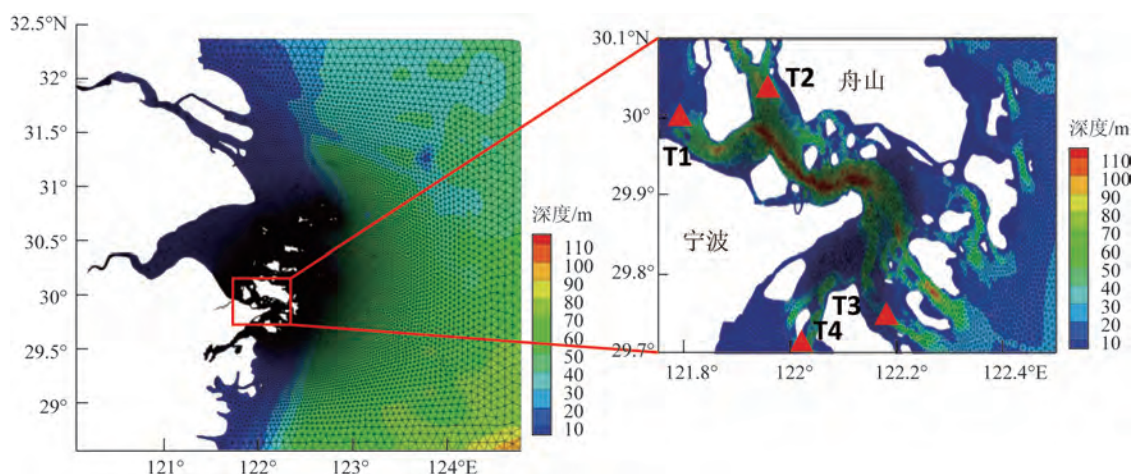


图1 计算区域网格分布图(放大区域为甬舟航道的网格加密区,T1—T4为实测潮位站点)

Fig.1 Grid distribution map of the calculation area (the zoom in area is the grid refinement area of the Yongzhou channel, and T1—T4 are the measured water level sites)

表1 临时验潮站观测资料

Tab.1 Observation data of temporary tide gauge station

观测内容	站位	观测时间	时间间隔	观测层次
潮位	镇海(T1)、六横台门(T2)、 六横(T3)、金塘(T4)	2020年3月27日—4月14日	1 h	—
潮流	2号浮标(30.19°N, 121.50°E)	2020年6月21—27日	1 h	表层、0.2H、0.4H、0.6H、 0.8H和底层
	金塘3#(30.08°N, 121.83°E)	2020年4月8—9日(大潮农历三月 十六至十七)以及4月1—2日(小潮 农历三月初九—初十)		表层、0.6H和底层

表2 M_2 、 K_1 、 S_2 和 O_1 分潮调和常数观测与模拟对比Tab.2 Comparison of observation and simulation of tidal constituents of M_2 , K_1 , S_2 and O_1

站点	分潮	观测		模拟		绝对误差		相对误差/%	
		振幅/cm	迟角/°	振幅/cm	迟角/°	振幅/cm	迟角/°		
T1	M_2	102.9	308.9	100.6	311.2	2.3	2.3	2.2	0.7
	K_1	28.9	208.5	31.1	210.1	2.2	1.6	7.6	0.7
	S_2	47.5	10.5	42.1	12.3	5.4	1.8	11.3	17.1
	O_1	19.8	175.8	21.5	177.2	1.7	1.4	8.5	0.7
T2	M_2	111.1	256.3	104.8	258.5	6.3	2.2	5.6	0.8
	K_1	33.4	198.2	30.5	202.1	2.9	3.9	8.6	1.9
	S_2	49.3	312.1	48.4	315.8	0.9	3.7	1.8	1.1
	O_1	19.4	169.9	21.6	172.6	2.2	2.7	11.3	1.5
T3	M_2	98.3	259.3	99.8	262.4	1.5	3.1	1.5	1.1
	K_1	32.1	200.5	30.2	202.2	1.9	1.7	5.9	0.8
	S_2	49.2	314.6	48.7	315.2	0.5	0.6	1.0	0.1
	O_1	20	153.9	21.2	168.5	1.2	14.6	6.0	9.4
T4	M_2	98.8	307.9	97.3	297.6	1.5	10.3	1.5	3.3
	K_1	33.8	202.6	30.6	208.1	3.2	5.5	9.4	2.7
	S_2	44.1	3.2	44.5	3.1	0.4	0.1	0.9	3.1
	O_1	19.8	169.5	21.1	174	1.3	4.5	6.5	2.6

和六横台门(T2)两个站点的观测潮位进行画图对比和平均绝对误差分析(见图2)。对比发现,模式模拟的潮位略低于实测潮位,部分时段的模拟潮位与实测潮位有较大差别,两个站点的平均绝对误差分别为0.211 m和0.100 m。从潮位整体变化情况来看,模式模拟潮位与实测潮位随时间的变化幅度较为一致,相位也较为一致,模式基本上可以模拟出潮位随时间的变化情况。

3.2 潮流验证结果

取对应金塘3#站点的大潮与小潮时间段的模式表层、0.6H和底层的流速和流向数据进行对比(见图3)。结果表明,模拟数据的最大流速值略低于实测潮流数据;最小流速值略高于实测潮流数据;变化相位在部分时刻略晚于观测数据。从整体来看,模拟流场与观测流场的变化趋势基本一致,

流场转向时刻也基本一致。取对应2号浮标位置的
模式表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H和底层相同时

间段的流速和流向数据进行误差分析(见表3)。结
果显示,流速的绝对平均误差均小于12 cm/s,流向

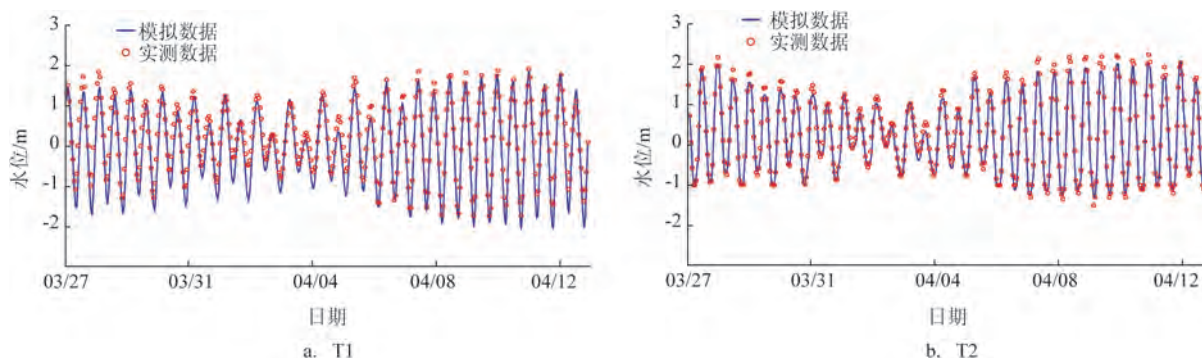


图2 T1、T2站点的模式潮位与观测值对比

Fig.2 Comparison between observed and model tidal levels at T1 and T2 stations

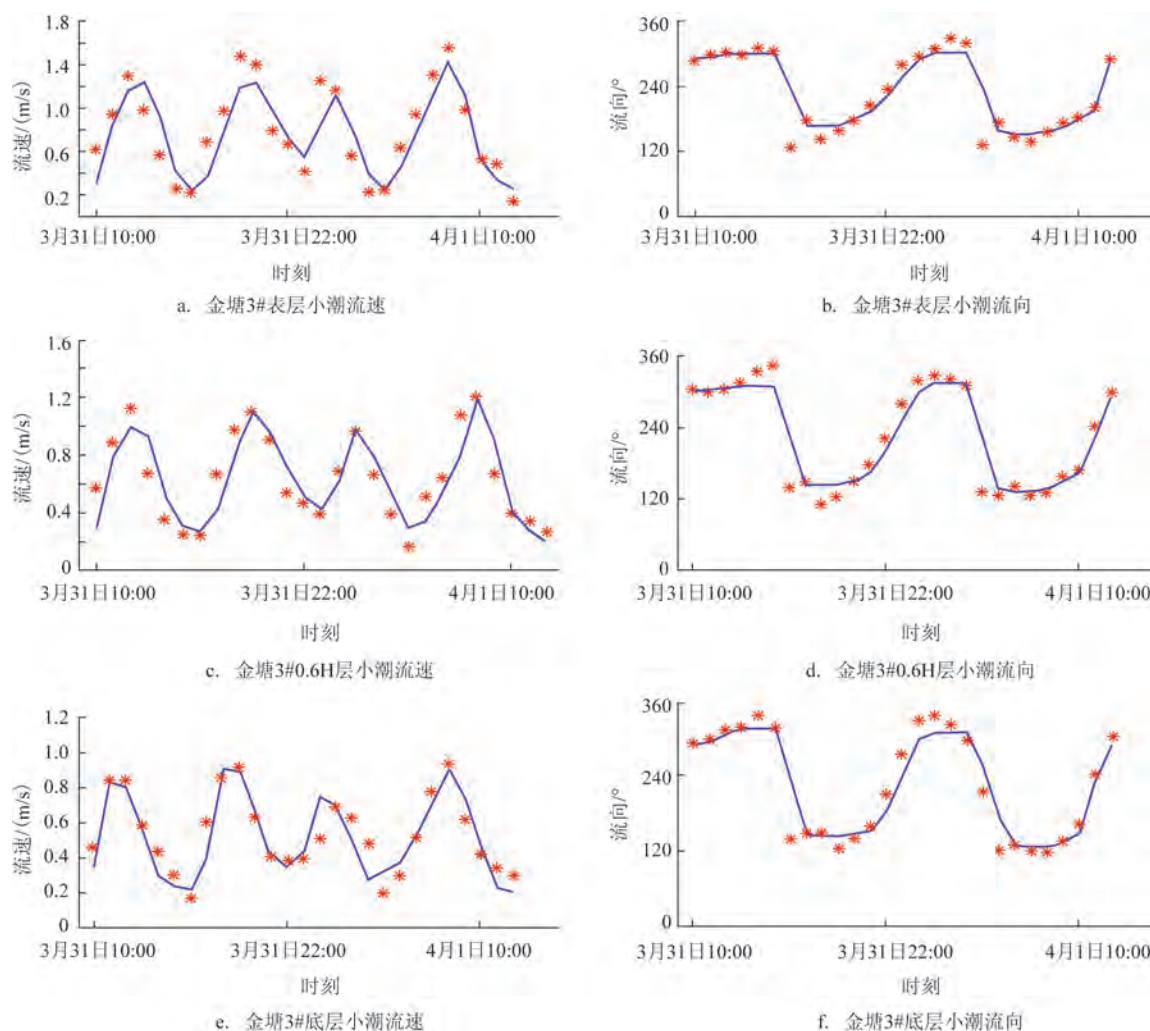


图3 金塘3#站点大潮期间表层、0.6H和底层的海流对比

Fig.3 Comparison of surface, 0.6H and bottom currents during spring tide at Jintang 3# station

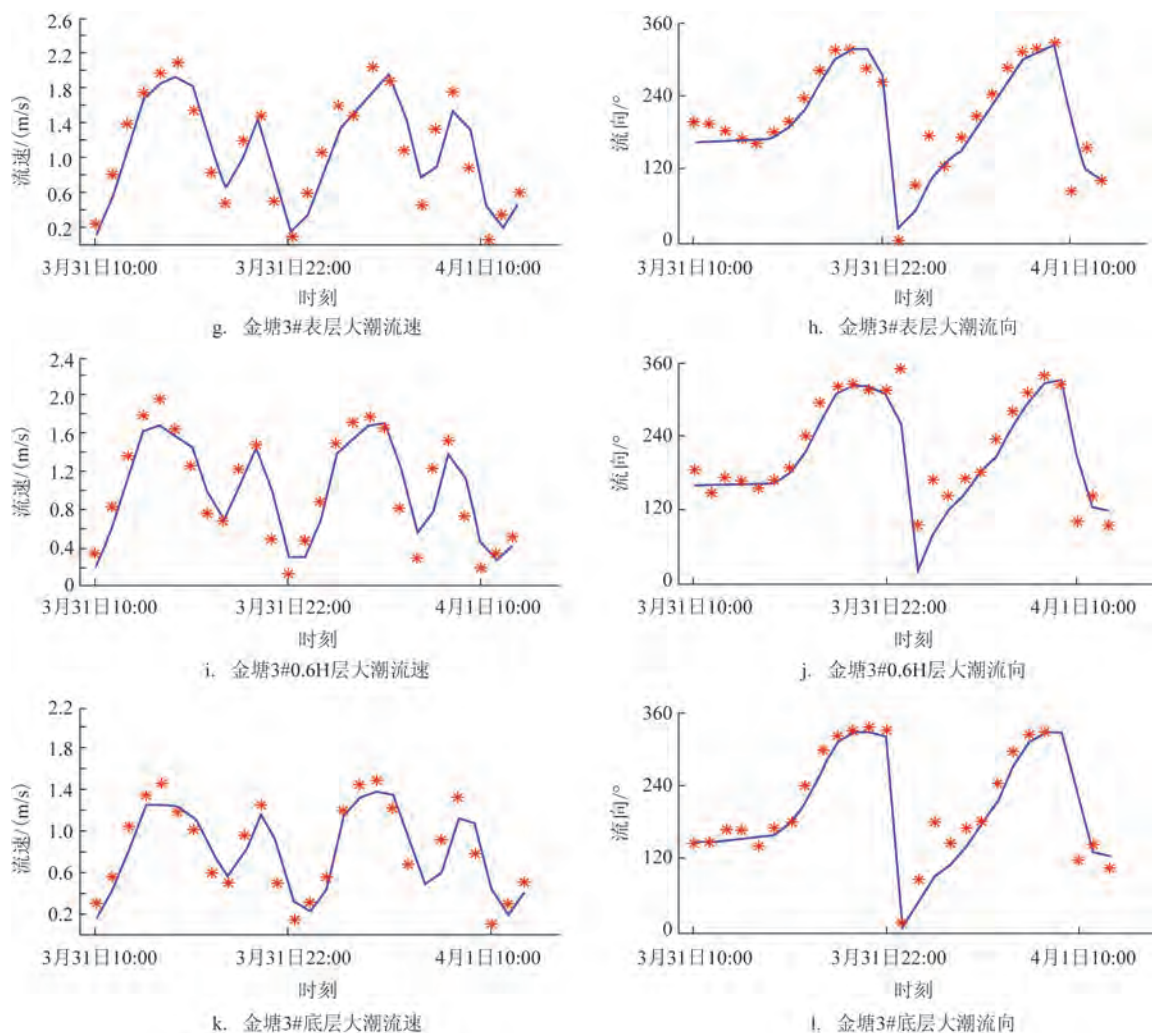


图3(续)

Fig.3 (Continued)

的平均绝对误差均小于 25° ,较好地刻画了甬舟航道及周边海域的海水流动时空特征。

4 潮汐性质及余流特征分析

4.1 潮汐性质分析

根据全日潮和半日潮的平均振幅比值可以基本判断一个区域内潮汐的性质。基于模式结果,本文对甬舟航道及周边海域的潮位数据进行调和分析,得到4个主要分潮(M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1)的调和常数,以此计算潮汐类型的判别系数。具体计算公式如下^[6]:

$$F = \frac{H_{O_1} + H_{K_1}}{H_{M_2}} \begin{cases} 0 < F \leq 0.5 & \text{规则半日潮} \\ 0.5 < F \leq 2.0 & \text{不规则半日潮} \\ 2.0 < F \leq 4.0 & \text{不规则全日潮} \\ F > 4.0 & \text{规则全日潮} \end{cases} \quad (1)$$

式中, F 表示潮型系数; H 代表各个分潮的平均振幅。

甬舟附近海域的潮型系数 F 介于 $0.35 \sim 0.6$ 之间(见图4a,黑色的分割线代表潮型系数 $F=0.5$),所以该海域内的潮汐类型为半日潮占主导。这种半日分潮占优的现象在同潮图中也有所体现,主要表现为半日分潮的振幅普遍大于全日分潮的振幅。同时还可以看出舟山群岛比较集中的海域以不规则半日潮为主,而离集中群岛较远的外围海域主要表现为规则半日潮,这主要是由于潮波传至近岸,

表3 2号浮标的垂向流速和流向对比的平均绝对误差
Tab.3 Average absolute error of vertical velocity and direction of buoy No. 2

层次	流速/(cm/s)			流向/°		
	大潮	中潮	小潮	大潮	中潮	小潮
表层	9.1	9.2	11.5	16.4	16.5	20.1
0.2H	8.1	8.2	10.0	17.3	15.1	14.5
0.4H	7.0	6.1	5.1	18.1	14.3	15.0
0.6H	6.4	4.5	3.2	20.0	15.2	16.2
0.8H	5.8	3.7	3.2	21.5	17.1	17.8
底层	5.0	3.6	3.0	25.0	16.5	15.3

受地形等非线性因素作用发生形变产生浅水分潮和复合分潮导致的。甬舟航道海域的潮汐系数普遍介于0.53~0.6之间,所以该航道海域的潮汐类型为不规则半日潮类型。

根据公式将得到的平均振幅计算得到最大可能潮差,对于半日分潮占优势的海域的计算公式为^[6]:

$$2 \times (1.29H_{M_2} + 1.23H_{S_2} + H_{K_1} + H_{O_1}) \quad (2)$$

式中, H_{M_2} 、 H_{S_2} 、 H_{K_1} 和 H_{O_1} 分别为各个网格上 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 4个分潮的平均振幅。甬舟附近海域的最大可能潮差呈现出由舟山群岛集中的海域向四周开阔海域方向逐步增加的分布趋势(见图4b),从3.9 m左右逐渐增大到5.7 m左右。在甬舟航道海域,最大可能潮差普遍介于4.5~4.7 m之间,甬舟航道西边界最大可能潮差低于东边界,相对整个舟山附近海域而言,该研究海域的最大可能潮差比较小。推测其原因,可能因为该海域处于舟山群岛的内部,而半日分潮传播至杭州湾的过程中,受到了群岛岸线及地形的遮挡出现了消耗。

对整个计算区域表层的模拟流场进行调和解析得到潮流椭圆要素,用来计算潮流类型的判断系数,具体公式及判别标准如下^[6]:

$$F = \frac{W_{O_1} + W_{K_1}}{W_{M_1}} \begin{cases} 0 < F \leq 0.5 & \text{规则半日潮流} \\ 0.5 < F \leq 2.0 & \text{不规则半日潮流} \\ 2.0 < F \leq 4.0 & \text{不规则日潮流} \\ F > 4.0 & \text{规则日潮流} \end{cases} \quad (3)$$

式中, W_{K_1} 、 W_{O_1} 、 W_{M_2} 分别为各个网格点上 K_1 、 O_1 和 M_2 分潮流的表层最大流速。

甬舟附近海域表层的潮流判别系数F值均小于2.0(见图4c),所以该海域内的潮流类型为半日潮流,并且大部分海域的潮流系数值小于0.5,说明了

规则半日潮流占主导,极小的区域表现为不规则半日潮流。甬舟航道海域的表层潮流判别系数介于0.1~0.15之间,所以该海域的潮流类型为规则半日潮流。

潮流的旋转性质由潮流椭圆要素中的旋转率K决定,K是潮流椭圆的短半轴(最小流速值)与长半轴(最大流速值)的比值,当K的绝对值大于0.25时,表现为旋转式潮流,K的绝对值小于0.25时,表现为往复式潮流^[7]。根据甬舟附近海域的表层潮流旋转率K值可以看出(见图4d,红色分割线代表旋转率K=0.25),西侧海域的潮流主要表现为往复流形式,只有少部分岸边区域表现旋转流;东侧开阔海域则主要表现为旋转流形式。甬舟航道海域的表层潮流旋转率普遍介于0~0.1之间,只有少部分岸边区域大于0.5,说明该海域主要表现为往复流,少部分岸边区域表现为旋转流。这是因为狭长的甬舟航道造成了潮流的旋转率变低,从而使甬舟航道的大部分区域表现为往复流,而靠近岸边的潮流旋转性比较强的原因是较浅的岸线对往复流的流动起到了遮挡作用,往复流在遮挡区的动力不足,因而潮流的旋转性变强。

本文给出了模式模拟甬舟航道及周边海域的4个主要分潮(M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1)的同潮图(见图5)。与4个主要分潮在甬舟航道及周边海域的同潮图^[6]对比,模式模拟的分潮振幅及迟角的数值分布形态与该图集较为吻合。

由4个主要分潮同潮图的等迟角线分布来看,甬舟航道周边海域内的潮波传播主要分为半日分潮和全日分潮两个方向,这与杨陇慧等^[8]提到的潮波传播一致,即半日分潮 M_2 和 S_2 由舟山海域的东南方向向西北方向传播;全日分潮 K_1 和 O_1 从舟山海域

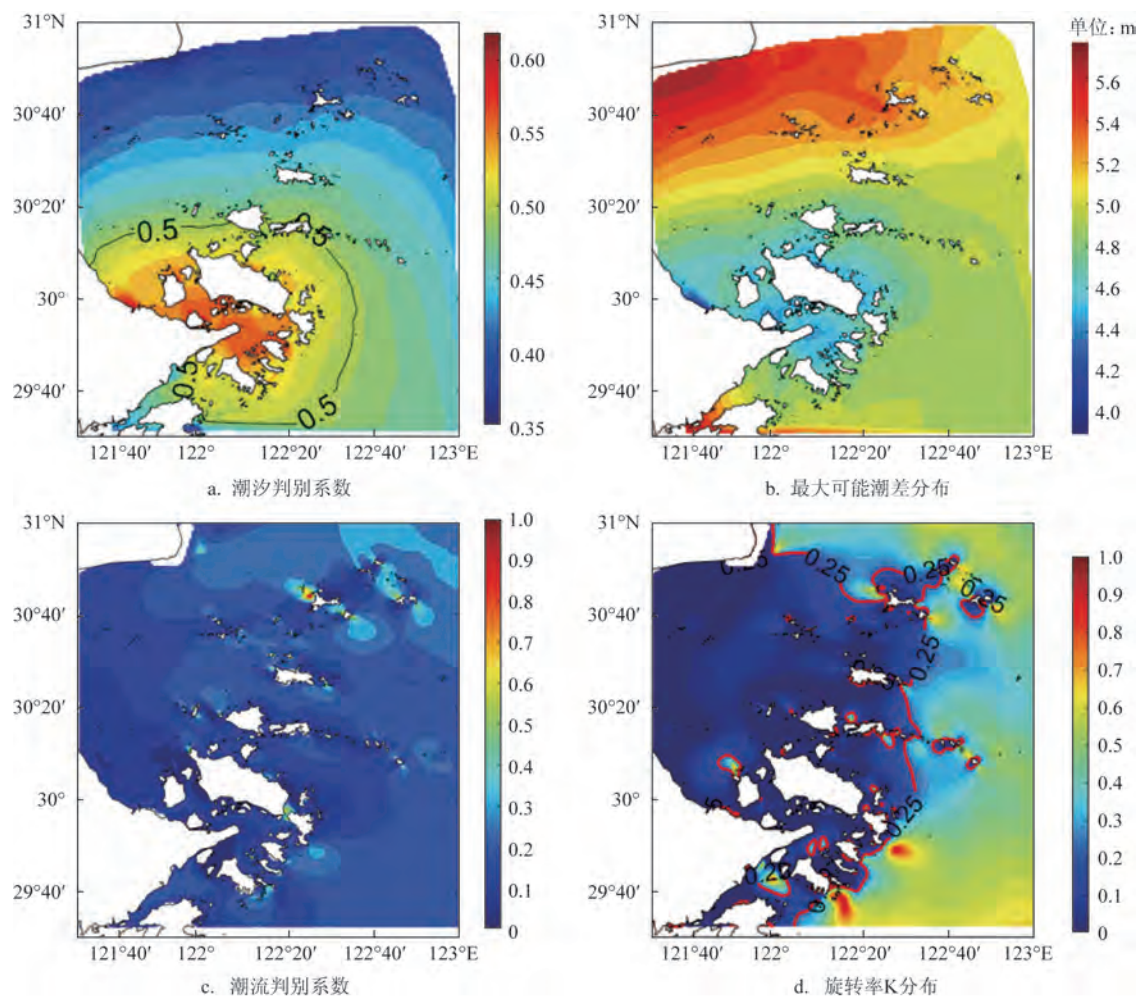


图4 甬舟航道及附近海域表层潮汐性质图

Fig.4 The surface tidal properties of Yongzhou waterway and adjacent sea areas

东北方向向西南方向传播。由4个主要分潮同潮图的等振幅线分布来看,半日分潮 M_2 和 S_2 的等振幅线围绕舟山本岛向舟山四周外围海域扩散增大, M_2 半日分潮的振幅增幅超过40 cm, S_2 半日分潮的振幅增幅约为10 cm;全日分潮 K_1 和 O_1 的等振幅线由东侧外围海域向陆地方向平行递增分布, K_1 全日分潮的增幅约为2 cm, O_1 全日分潮的增幅约为4 cm。另外,甬舟航道附近海域中没有发现无潮点,这与陈倩^[9]的研究结果一致。甬舟航道海域4个分潮的平均潮汐振幅和迟角差分别为95 cm和280°、43 cm和330°、30 cm和205°以及21 cm和172°,可以看出4个主分潮在甬舟航道内的比重为 M_2 分潮最大, S_2 次之, K_1 和 O_1 依次减小。

将潮流表层椭圆要素绘制成4个主要分潮(M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1)的椭圆图(见图6,红色椭圆代表顺时针

旋转,蓝色椭圆代表逆时针旋转)。整体上看,舟山海域东侧的潮流旋转性较强,但流速较弱,而西侧区域多为往复流,流速较强。同时还可以看出潮流的运动形态和旋转方向会因潮波传播方向和地形的变化而变化,在潮波遇到岛屿之前潮流普遍表现为顺时针旋转流,进入群岛内部后,因受地形的限制和影响更多表现为顺时针和逆时针旋转并存的往复流。甬舟航道海域内的表层潮流椭圆主要表现为顺时针和逆时针并存的往复流,流向与水道的岸线近似平行,流速最大值普遍分布于水道中心处。另外,甬舟航道内的半日潮流的长半轴大于全日潮流的长半轴,说明了半日潮流的量级大于全日潮流, M_2 分潮的最大流速为1.8 m/s, S_2 分潮潮流椭圆分布与 M_2 分潮极为相似,但流速要小的多,最大流速仅为0.6 m/s, K_1 和 O_1 分潮的最大流速分别为

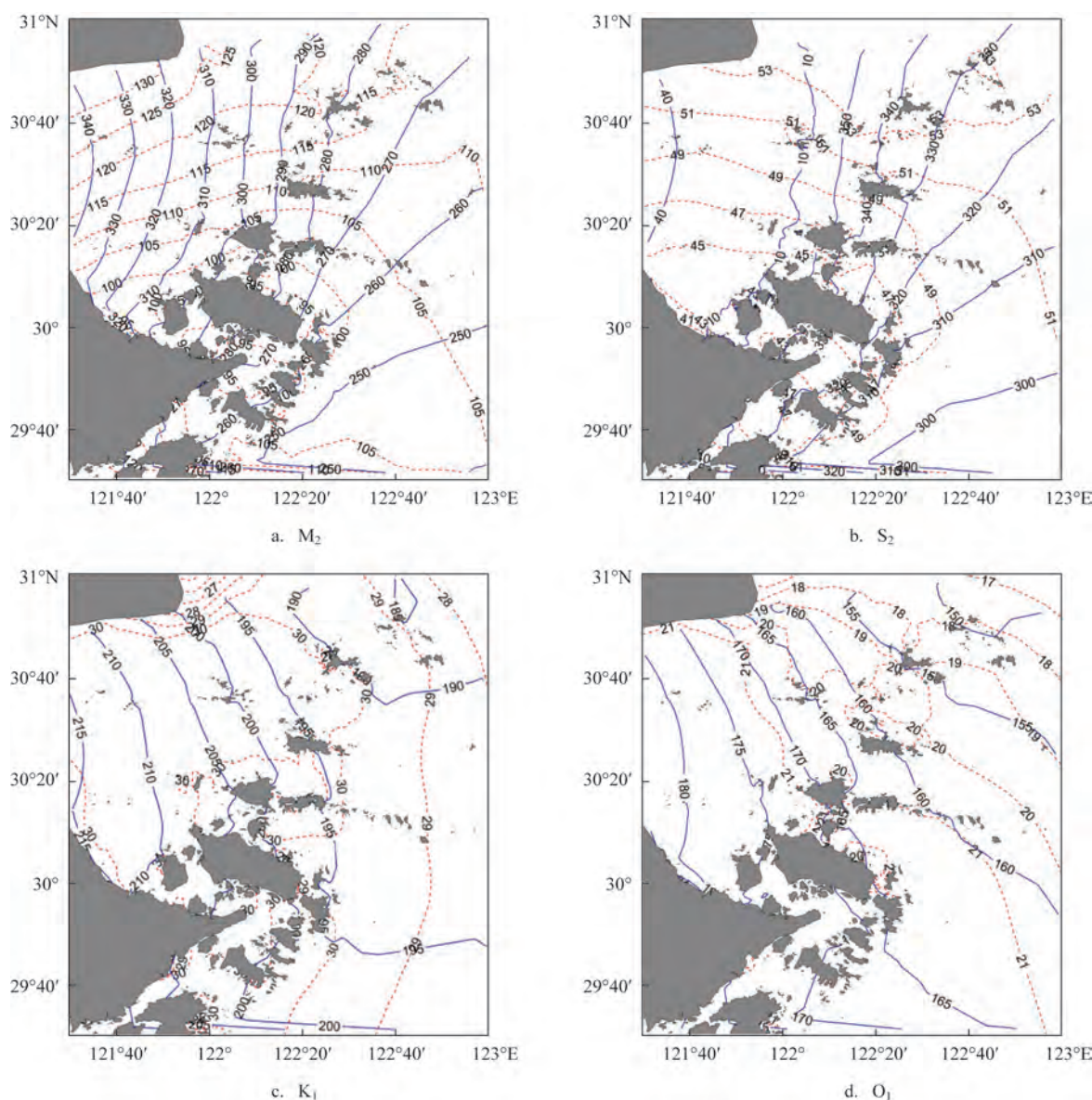


图5 甬舟航道及附近海域同潮图

Fig.5 Cotidal chart of Yongzhou waterway and nearby sea area

0.16 m/s 和 0.13 m/s。

本文未考虑浅水分潮,根据《海港水文规范》^[10],规则半日潮流海域的表层最大可能流速的计算公式如下:

$$\vec{V}_{\max} = 1.295\vec{W}_{M_2} + 1.245\vec{W}_{S_2} + \vec{W}_{K_1} + \vec{W}_{O_1} \quad (4)$$

式中, \vec{V}_{\max} 是潮流的最大可能流速, \vec{W}_{M_2} 、 \vec{W}_{S_2} 、 \vec{W}_{K_1} 、 \vec{W}_{O_1} 分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 分潮流的椭圆长半轴矢量。我们绘制出甬舟航道最大可能流速图(见图7),由图可以看出,最大可能流速在甬舟航道的岸边向水道中心逐渐增加,靠近岸边最大可能流速较

小,靠近水道中心的最大可能流速较大,最高值可达 3.2 m/s,这种现象的形成与群岛内部水道岸线的分布及水深变化规律息息相关。下面具体分析不同潮时的流场分布。

本文给出了模型模拟甬舟航道海域 01—24 时的潮位变化曲线(见图8,潮位点的位置为 122.2°E, 29.7°N),并给出了对应潮时时刻刻的表层和底层的流场分布图(见图9和10,图中颜色表示流速大小,箭头表示潮流方向)。由图8可以看出,低潮时刻分别为 01 时和 14 时,涨急时刻分别为 04 时和 17 时,高

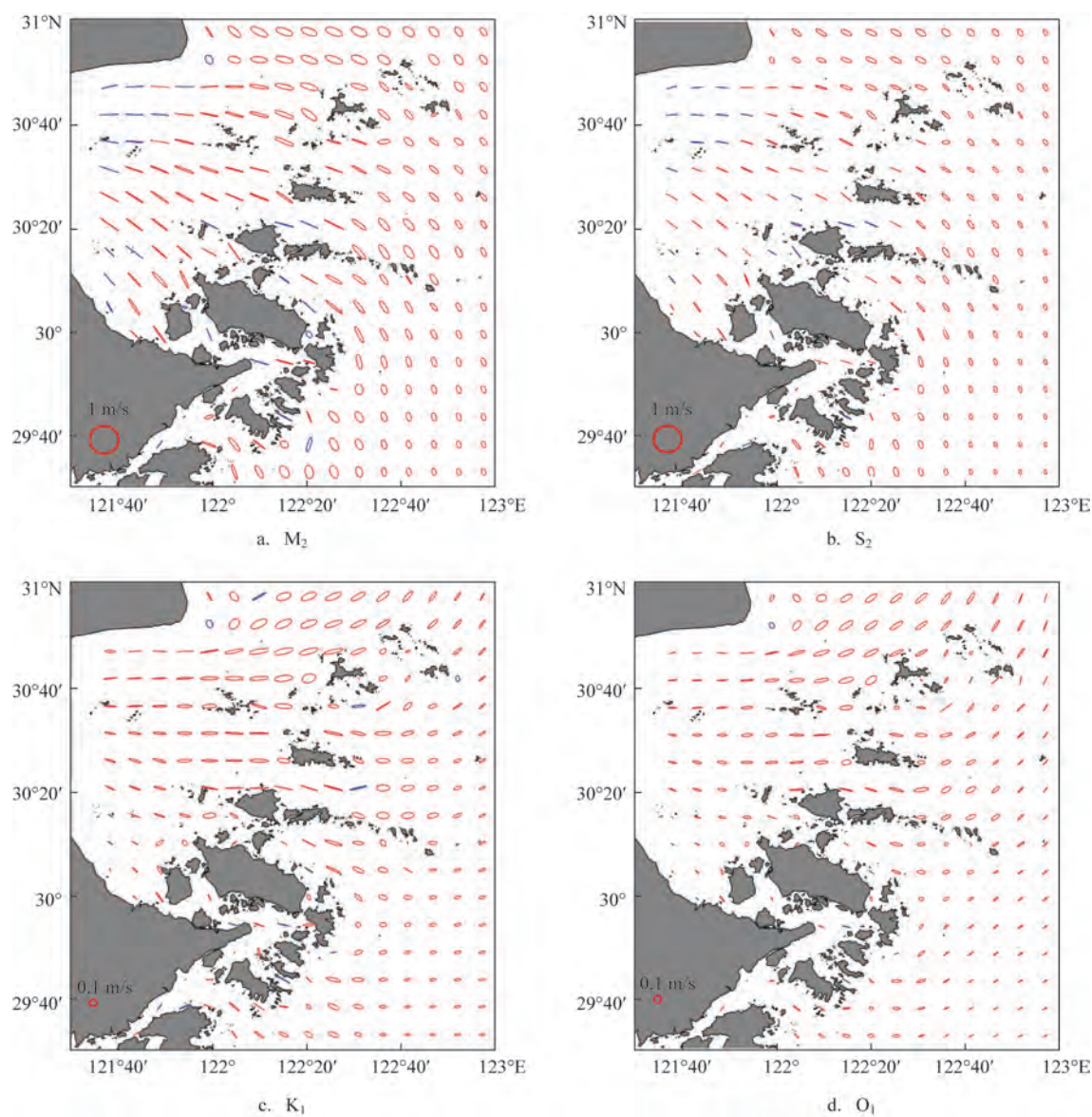


图6 甬舟航道及附近海域潮流表层椭圆图

Fig.6 Elliptic chart of surface tidal current in Yongzhou waterway and adjacent sea area

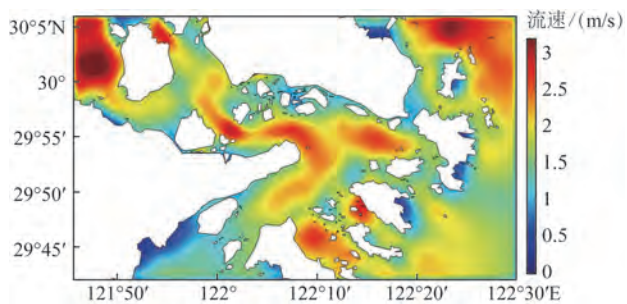


图7 甬舟航道海域表层最大可能流速图

Fig.7 Maximum possible velocity map of surface layer in Yongzhou waterway

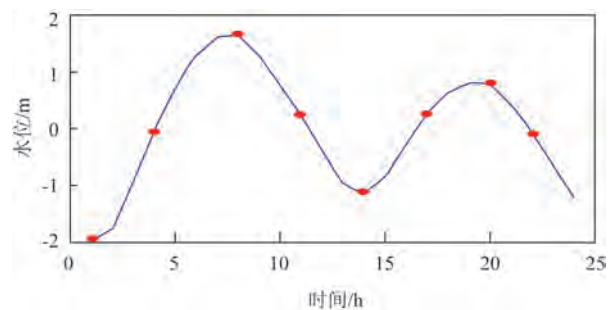


图8 甬舟航道海域的潮位变化曲线

Fig.8 The tidal level variation curve of Yongzhou channel

潮时刻分别为08时和20时,落急时刻分别为11时和22时。由图9和图10的整体流场分布来看,航道中心的流速普遍大于岸边流速,这是因为潮流进入较狭窄水道时辐聚增强。当潮位处于高潮或低潮时刻,流场处于息流状态,流速非常小,近岸边的表

层流速介于 $0\sim 0.4$ m/s,底层流速介于 $0\sim 0.2$ m/s;水道中心的表层流速介于 $0.4\sim 1.2$ m/s,底层流速介于 $0.2\sim 0.6$ m/s。当流场处于涨急或落急时,流场流速达到最大,尤其是航道海域中间的水深较大部位具有较大的流速,近岸边的表层流速介于 $0\sim 0.8$ m/s,

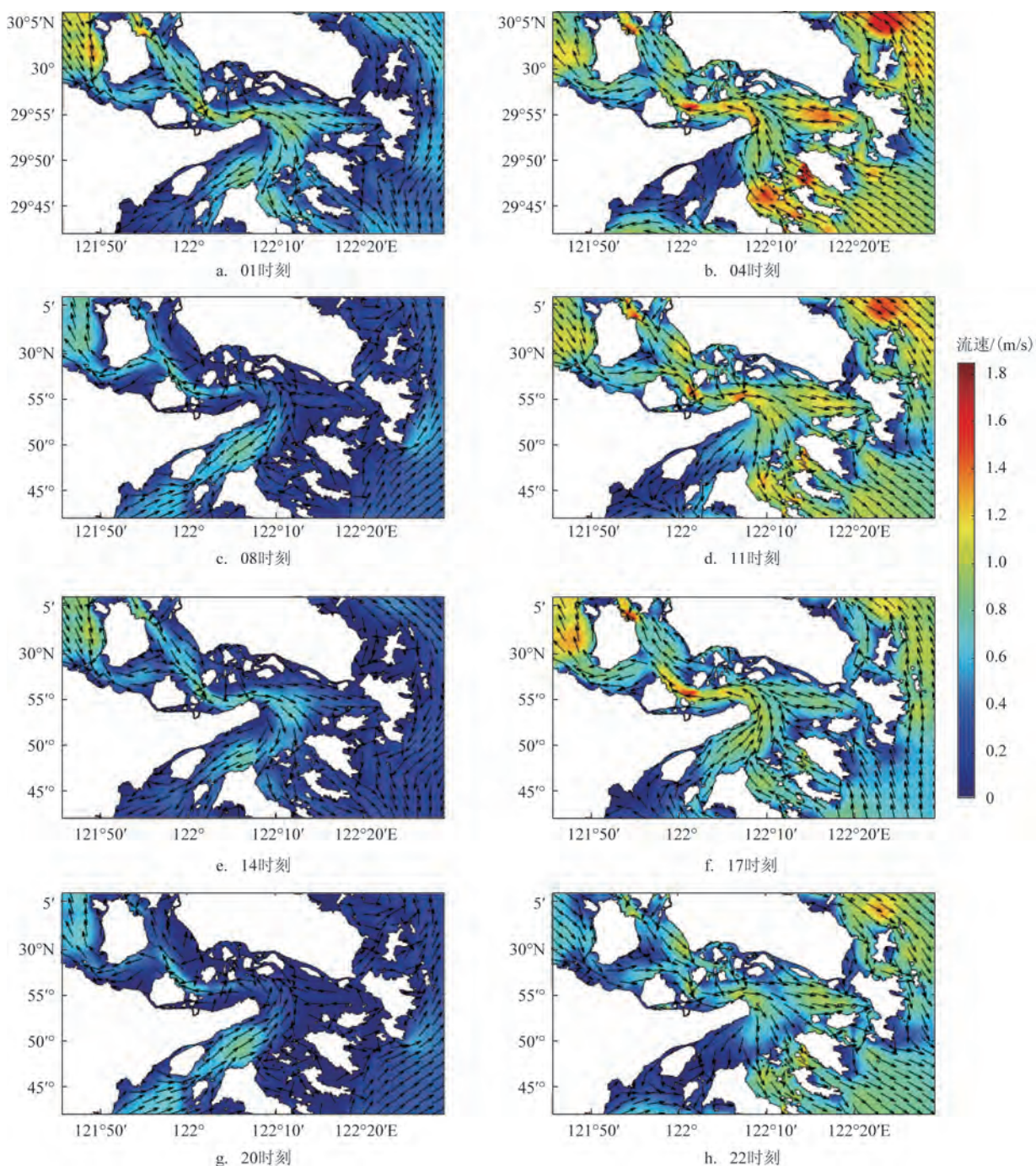


图9 甬舟航道海域不同潮时的表层流场图

Fig.9 Surface flow field at different tidal time in Yongzhou waterway

底层流速介于 $0\sim 0.6\text{ m/s}$;水道中心的表层流速介于 $0.8\sim 1.8\text{ m/s}$,底层流速介于 $0.6\sim 1.2\text{ m/s}$ 。低潮与落急时刻的流场流向相同,海水由西北流向东南方向;高潮与涨急时刻的流场流向相同,海水由东南流向西北方向。

4.2 潮余流特征分析

本文用模式模拟得到的1个潮周期的流场减去调和和分析预报的潮流得到余流,然后将余流做平均,计算得到表层潮致余流,分析结果如下。

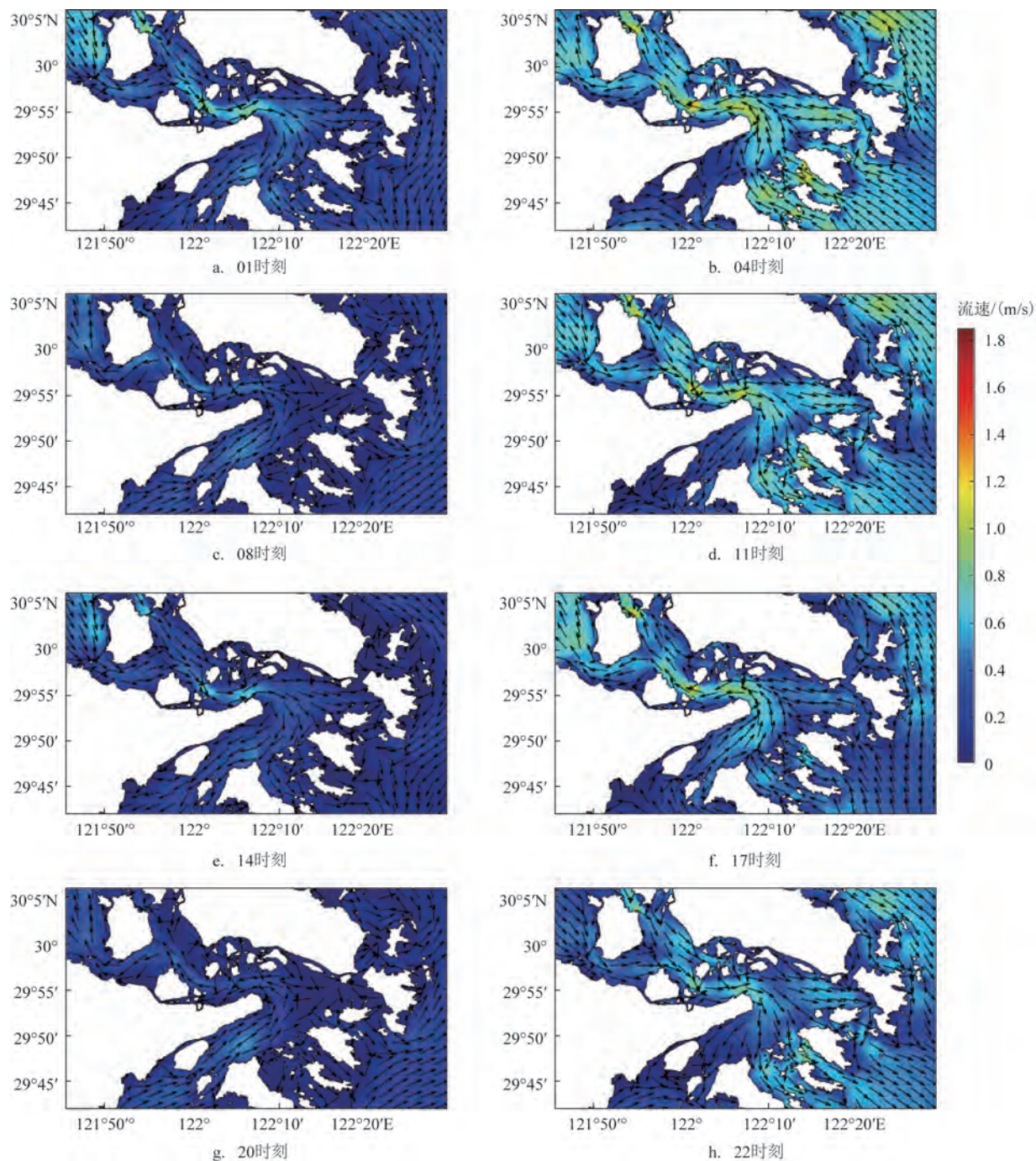


图10 甬舟航道海域不同潮时对应的底层流场图

Fig.10 The bottom flow field corresponding to different tidal time in Yongzhou waterway

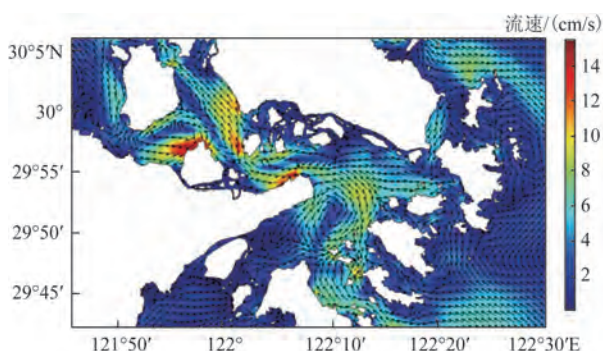


图11 甬舟航道海域的表层潮流场分布图(箭头表示流速方向)

Fig.11 Distribution map of surface tidal current flow field in Yongzhou waterway (arrow represents flow direction)

从图11中可以看出,甬舟航道内的潮致余流具有以下特征:(1)潮致余流量级有1~15 cm/s,较强的潮致余流分布在29.89°~30.03°N, 121.87°~122.13°E范围内,最强的余流中心位于29.95°N, 121.95°E;余流的走向大致是从东南侧传入西北侧。(2)潮致余流存在两个较为明显的闭合环流:一个是中心位于29.85°N, 122.18°E的气旋环流,直径大概为1/5经度,覆盖在甬舟航道的东南侧,流速约为3~9 cm/s;另一个是中心位于29.97°N, 121.92°E的反气旋环流,直径比气旋环流较小,覆盖在甬舟航道西北侧,流速大概为1~15 cm/s。

5 总结

本文基于FVCOM三维海洋模型建立了甬舟航道及周边海域的三维潮汐潮流数值模型。将临时验潮站与模型的调和常数对比,结果较为吻合。潮位的平均绝对误差小于0.211 m,流速和流向的平均绝对误差分别小于12 cm/s和25°,对比结果显示模型具有较高的精度。利用数值模拟结果对甬舟航道舟山海域的潮汐潮流及余流进行分析。结论如下:

(1)甬舟航道舟山海域的潮汐系数介于0.53~0.6之间,潮汐类型表现为不规则半日潮;最大可能潮差普遍介于4.5~4.7 m之间,甬舟航道西边界最大可能潮差低于东边界;4个主分潮比重为 M_2 分潮最大、 S_2 次之、 K_1 和 O_1 依次减小。

(2)甬舟航道及附近海域的潮流判别系数均小于2.0,且大部分区域的潮流系数值小于0.5,所以该航道附近海域主要由规则半日潮流占主导,只有极小的区域属于不规则半日潮流;潮流椭圆的长轴方向沿地形及岸线方向平行分布,在航道中心多表现为往复流,只有极少靠近岸边的潮流表现为旋转流;潮流最大可能流速达3.2 m/s,4个主要分潮的最大流速分别为1.8 m/s、0.6 m/s、0.16 m/s和0.13 m/s;潮流流速的分布与航道的地形变化息息相关,越远离岸边流速越大,最大流速值普遍分布在水道的中心。

(3)甬舟航道西北侧的潮致余流量值比东南侧大。航道内存在两个闭合环形余流,一个是中心位于29.85°N, 122.18°E的气旋环流,另一个是中心位于29.97°N, 121.92°E的反气旋环流。

通过精确模拟甬舟航道舟山海域的水动力环境,可以为该区域的水交换、运输以及海上科研工作提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 蒋志婷. 舟山群岛海域潮汐动力的数值模拟研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
Jiang Z T. Numerical simulation of tidal dynamics in the Zhoushan Archipelago waters[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018.
- [2] 寿玮玮. 舟山群岛附近海域水动力特征及其对物质运输的影响分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Shou W W. Hydrodynamic characteristics and its impact on mass transport in the Zhoushan Archipelago sea area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [3] 熊伟, 刘必劲, 孙昭晨, 等. 宁波舟山近海三维潮汐潮流数值模拟[J]. 水道港口, 2011, 32(6): 399-407.
Xiong W, Liu B J, Sun Z C, et al. 3D numerical simulation of tide and tidal currents in sea adjacent to Ningbo and Zhoushan[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2011, 32(6): 399-407.
- [4] 安佰超. 基于FVCOM的杭州湾及邻近海域潮汐动力学数值模拟和应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
An B C. Numerical studies and application of tidal dynamics based on FVCOM in Hangzhou Bay and adjacent seas[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [5] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [6] 海洋图集编委会. 渤海黄海东海海洋图集-水文[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
Editorial Committee of Marine Atlas. Marine atlas of Bohai Sea

- Yellow Sea East China Sea-hydrology[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [7] 杨成浩, 廖光洪, 罗锋, 等. 乐清湾的潮位、潮流和余流特征[J]. 海洋学研究, 2010, 28(2): 1-13.
- Yang C H, Liao G H, Luo F, et al. Features of the tidal level, tidal currents and residual currents in Yueqingwan Bay[J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(2): 1-13.
- [8] 杨陇慧, 朱建荣, 朱首贤. 长江口杭州湾及邻近海区潮汐潮流场三维数值模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2001(3): 74-84.
- Yang L H, Zhu J R, Zhu S X. 3-D numerical simulation of tide and tidal current fields in the Changjiang Estuary, Hangzhou Bay and their adjacent sea[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2001(3): 74-84.
- [9] 陈倩. 浙江近海潮汐潮流的三维数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- Chen Q. Three-dimensional simulation of tides and tidal currents in the seas adjacent to Zhejiang[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 海港水文规范(JTS 145-2-2013) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of hydrology for sea harbor (JTS 145-2-2013) [S]. Beijing: China Communications Press, 2013.

Numerical simulation and characteristic analysis of tidal current in the Yongzhou channel

PENG Tengting, JI Qiyang, LIU Yu, ZHANG Jie, SUN Yongzhao, SU Yu, YIN Yichen

(Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 266061 China)

Abstract: Based on unstructured grid Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM), a three-dimensional numerical model covering the Yongzhou channel ($121.78^{\circ} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$, $29.7^{\circ} \sim 30.1^{\circ}\text{N}$) and its adjacent waters is established to simulate the tide and tidal current in this paper. The simulated results are in good agreement with the observational data from 4 tide gauge stations and 2 continuous current measuring stations, which reveals that the results of numerical simulation could well reflect the variation and distribution characteristics of the tide and tidal current movement in the channel area. The results show that it is irregular semi-diurnal tide in the channel with the maximum tidal range between $4.5 \sim 4.7$ m. The tidal currents in the channel is generally reciprocating flow, and rotating flow only shows in a small part of the channel bank. The maximum velocity of tidal current is distributed in the narrow and deep waterways, while the velocity along the shallow bank is relatively smaller. The tidal residual current is between $1 \sim 15$ cm/s generally propagating from southeast to northwest, and forms two obvious closed circulations on the northwest and southeast sides of the channel.

Key words: FVCOM; Yongzhou channel; tide and tidal current