

基于 FVCOM 的温州近海潮汐潮流数值模拟^{*}

岳云飞¹, 王永刚^{2,3*}, 何善方⁴, 汪一航¹, 魏泽勋^{2,3}

(1. 宁波大学 理学院, 浙江 宁波 315211; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 国家海洋局 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

4. 国家海洋局 宁波海洋环境监测中心站, 浙江 宁波 315012)

摘 要: 基于有限体积法海洋数值模型(FVCOM), 构建了温州近海潮汐潮流数值模式, 模式模拟区域为(120°24'00"~121°19'12"E, 27°21'00"~28°24'00"N), 模式水平分辨率由近岸河口区的 50 m, 逐渐增加至开边界附近的 2 km。模式模拟并分析了温州近海的 M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 五个主要分潮。利用温州近海实测资料对模拟结果进行了验证, 模拟与实测符合良好; 其中与 4 个验潮站资料比较, M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 五个主要分潮的振幅绝均差和迟角绝均差分别为 4.84 cm 和 5.14°, 2.19 cm 和 3.35°, 5.18 cm 和 4.38°, 0.64 cm 和 3.67°, 0.59 cm 和 4.61°; 与 9 个海流连续观测站比较, 流速绝均差为 11.71 cm/s, 流向绝均差为 9.66°。在模拟结果较好地反映温州近海潮汐、潮流运动状况的基础上, 本文给出了各模拟分潮的潮汐同潮图和潮流椭圆分布、潮汐和潮流类型分布以及最大可能潮流分布等。

关键词: FVCOM; 温州近海; 潮汐; 潮流

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)02-0142-13

温州市地处浙江省东南部, 全境位于(119°37'~121°18'E, 27°03'~28°36'N), 它的北面和东北面是台州市, 东面是东海, 南部与福鼎市相连接, 西部是丽水市。温州海岸线大致为北到东北走向, 有洞头列岛、北麂列岛、南麂列岛等众多岛屿, 海域面积约 11 000 km², 属于强潮海区。温州沿海交通四通八达, 工业、农业、外贸和旅游业发展迅速。

由于平原和盆地比例较低, 土地资源短缺, 人均耕地和人均生态承载力均低于浙江省和全国平均水平。因而, 温州沿岸产业带围填海工程众多, 围填海也成为缓解土地资源短缺、开辟新空间的主要方法之一。温州市东部濒临东海, 其地理位置特征决定了温州的优势、潜力和希望在于对海洋的开发和利用, 而了解并掌握海洋水动力环境特征是海洋资源开发利用的基础。潮汐潮流是该海域最主要的水动力环境控制要素, 因此把温州近海作为一个整体, 建立潮汐潮流数值模型, 研究与分析其特征具有十分重要的意义。

温州沿海的潮汐潮流特征, 一直以来备受关注, 前人已作过大量数值研究工作, 但采用的潮波数值模式或区域太大、分辨率较低, 或仅关注于局部的小海湾。如陈倩等^[1-3]采用三维陆架海模式(HAMSOM)对浙江近海的潮汐、潮流进行了成功的数值模拟, 并且依据近年来浙江海岸线和海岛调查的实测海流资料, 研究了浙江近海的潮流、余流特征和分布规律, 与实测情况符合良好, 使我们对浙江整个区域的潮汐潮流、余流特征有了一个全面的认识, 但其分辨率为 1', 无法细致刻画温州近岸及局部海湾的潮波特征; 李孟国等^[4-6]和郑敬云等^[7]开展了瓯江口及洞头岛北岙后涂围垦工程的潮流数值模拟研究, 并在大量实测资料和大量文献的基础上, 分析了瓯江口水文泥沙特征, 并且对温州水动力开发及研究情况进行了综述; 杨成浩等^[8]在代表春、夏、秋、冬四个季节航次调查的 4 个连续观测站位的实测潮位和海流数据的基础上, 分析研究了乐清湾的潮位、潮流和余流特征。可见, 已有的大区域研究及区域较小的湾口和河口局部海域的研究所提供的潮波运动特征虽各有侧重, 但尚缺乏针对整个温州近海区域的高分辨率潮波数值模式, 以精细刻画温州沿海潮波规

^{*} 收稿日期: 2014-09-17

资助项目: 浙江省海洋与渔业局项目——温州沿海产业带围填海(工程)海洋环境影响评价(ZHYWZ201202)

作者简介: 岳云飞(1989-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事海洋数值模拟方面研究。E-mail: yueyf@fio.org.cn

^{*} 通讯作者: 王永刚(1977-), 男, 内蒙古赤峰人, 副研究员, 博士, 主要从事潮汐潮流和海洋环流方面研究。E-mail: ygwang@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

律。

本文基于 FVCOM 模式,采用温州近海海图资料提取水深数据,把温州作为一个整体进行了高分辨率的潮波数值模拟研究。利用实测潮汐潮流资料对模拟结果进行了检验,模拟结果和实测数据均符合良好。在此基础上,分析了该海域潮汐潮流的分布及特征,为深入了解温州海域的水动力特征及工程实践提供了参考依据。

1 模式及计算配置

本节首先分析了温州地形地貌特征及潮波模型优选情况。然后介绍了计算区域水深数据来源、网格设置、开边界的选取等计算配置和方案。

1.1 潮波模式选取及建立

由于温州近海岸线曲折,地形复杂,岛屿星罗棋布,由南向北的主要港湾河口有鳌江、飞云江、瓯江、乐清湾等,均属于强潮海区。温州沿海平均潮差 4.5 m,最高达到 7.21 m,是我国高潮差区。温州沿海滩涂资源较为丰富,研究表明,若不考虑滩涂及干湿过程的处理,所得潮流振幅和纳潮量都普遍减小^[9]。为了再现温州海域潮汐、潮流分布特征,必须考虑海水对滩涂的“淹”和“露”的过程,故需要选用具有对于潮间带进行处理的可变边界模拟能力的数值模型。另外,对于岸线曲折,地形复杂,岛屿众多,沿海滩涂广阔的温州近海海域,选用非结构三角网格模式将能够在适当的计算需求下,实现关注海域的高分辨率模拟。

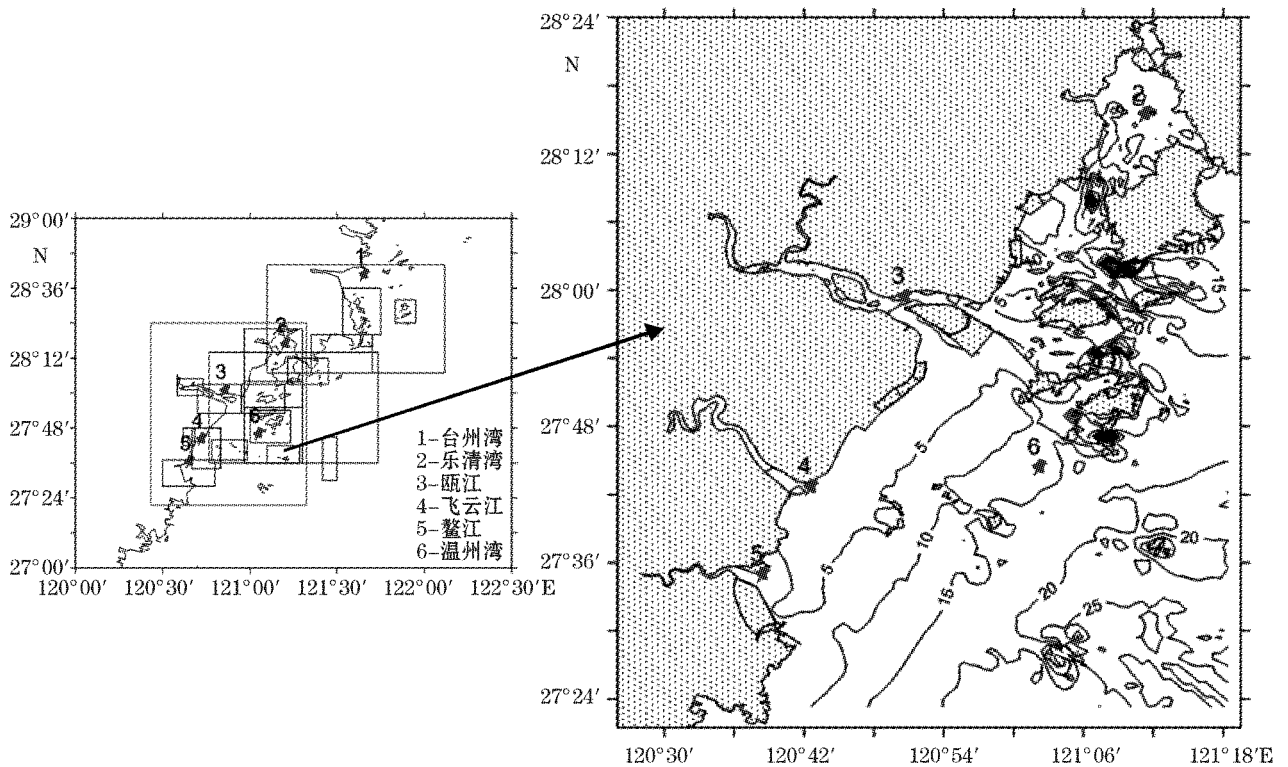


图 1 研究区域海图覆盖情况及水深地形图

Fig.1 Chart coverage and topography of the study area

基于上述原因,本文计算模型采用基于有限体积法的 FVCOM (An Unstructured Grid Finite-Volume Coastal Ocean Model) 海洋数值模型^[10],该模式为美国麻州大学(The University of Massachusetts)海洋科学技术学院陈长胜所领导的研究小组开发,水平方向采用非结构三角形网格,垂直方向采用 σ 坐标系来体现不规则的底部边界,能够较好地拟合温州近海曲折的海岸线和复杂的地形^[11]。同时,采用干湿判别方法来处理潮滩移动边界。

1.2 水深资料来源

在潮汐潮流数值模拟中,水深是至关重要的基础资料。从前人研究结果中我们可以发现,现有的格点化水深数据 etopo1(1'分辨率)、etopo2(2'分辨率)和 etopo5(5'分辨率)(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/>)针对于大区域海区 and 深海区可以得到较满意的模拟结果,而在沿岸浅海区则不尽理想^[12]。为了较真实地反映温州近海地形,本文收集了海军司令部航海保证部出版的能够覆盖研究区域的多张海图,通过对这些海图进行数字化处理和基准面订正,提取得到了温州近海研究区域的水深资料。对于部分没有海图资料的区域则采用 etopo1 的数据融合得到了研究区域的水深资料,岸线则提取自海图资料并利用该海区卫星遥感影像进行了一定的修订。收集的海图编号有 13811*,13781,13770,13751,13741B,13741A,13715,13651,13640,13640*,13661,13672,13710,13731,13771A,13771B,13791。模式中采用的水深地形图及海图覆盖情况见图 1。

1.3 计算海域

本研究计算海区为温州近海($120^{\circ}24'00''\sim 121^{\circ}19'12''\text{E}$, $27^{\circ}21'00''\sim 28^{\circ}24'00''\text{N}$,图 2),数值计算区域岸线复杂曲折,主要包括乐清湾、瓯江口、飞云、鳌江及其周边海域。模型采用无结构的三角形网格系统,在垂直方向采用 σ 坐标,垂向分 6 层。计算区域共包含 181 483 个三角单元,94 949 个网格节点,最小网格步长为 50 m,主要在瓯江、飞云、鳌江河口,乐清湾内部约在 350 m 左右,分辨率由岸线向东海方向逐渐增加,开边界取在坎门、南麂列岛、北麂列岛和石砰四点的连线上,开边界节点数为 66 个,在开边界处网格步长约 2 000 m。FVCOM 模型采用内外模分离的方式求解,二维外模数值格式是基于三角形网格的有限体积法,将连续方程和动量方程在三角形单元内积分后,通过改进的四阶龙格库塔方式求解。三维内模的动量方程采用简单的显式和隐式相结合的差分格式求解,外模时间步长为 0.2 s,内外模时间步长比率为 5。在温州近海的部分海域,对网格进行了加密,尤其是在河口、湾内这些敏感海区和一些狭窄的通道地区。从图 2 可以看出:三角网格较好地刻画了计算区域内复杂的岛屿岸线和地形特征以及围填海所造成的海岸线的变化,较精细地拟合了温州近海复杂的岸线。

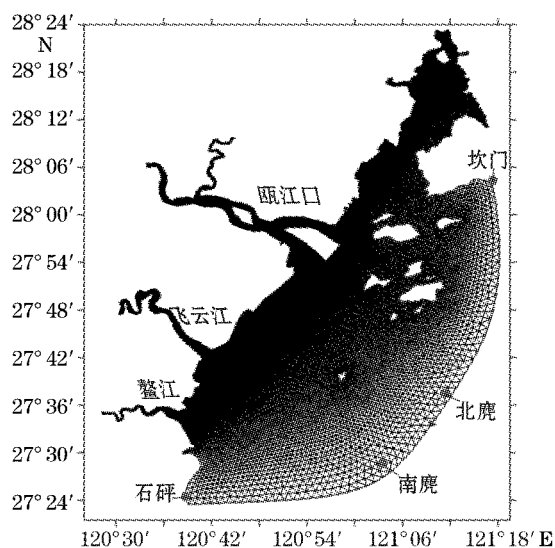


图 2 计算网格

Fig. 2 Computation grid

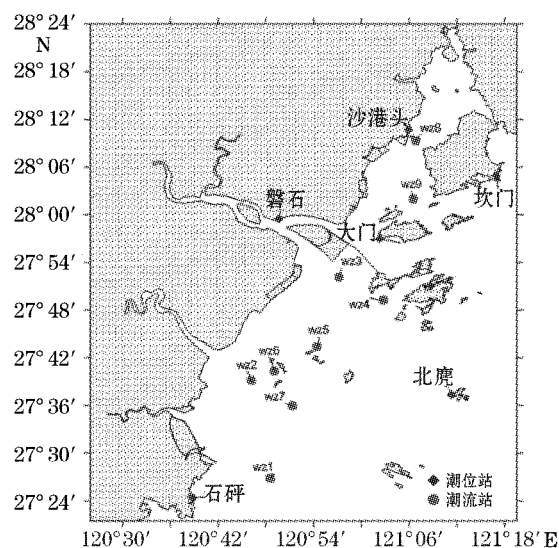


图 3 站位分布图

Fig. 3 Distribution of observation stations

1.4 开边界选取

在近海,特别是河口、湾内的潮汐潮流水动力数值模拟中,开边界条件的确定直接决定了计算结果的好坏。利用 FVCOM 模型开展潮波模拟有两种开边界条件可选,即采用调和常数或实时水位^[13]。本文数值模式的开边界条件主要是利用边界附近的验潮站资料结合浙江近海同潮图分布特征,将 M_2, S_2, N_2, K_1 和 O_1 分潮的调和常数插值到计算海域的开边界网格节点上,然后由 $T_tide^{[14]}$ 的预报程序给出开边界上每个节点的实时水位作为开边界条件,并以此驱动潮汐潮流数值模式。各节点上水位预报公式如下:

$$\eta = \sum_{i=1}^5 f_i h_i \cos(\omega_i t + v_{0i} + u_i - g_i) \tag{1}$$

式中, η 为水位; h_i 和 g_i 为第 i 个分潮的调和常数; ω_i 为分潮的角速度; t 为时间; f_i 为分潮的交点因子; v_{0i} 为分潮的天文初相; u_i 为分潮的交点订正角。

本文采用正压模式,假设海洋是静止的,水位初始值设为 0,所有三角单元中心点的水平和垂向流速为 0,整个海域内温度和盐度均取常数,温度为 18.0 °C,盐度为 35.0。底摩擦系数取 0.002 5,模式模拟 30 d。对后 15 d 时间序列进行调和分析,得到 5 个主要分潮的潮汐和潮流的调和常数。

2 模拟结果验证

为了验证模拟结果,本文收集了温州海域 9 个海流连续观测站和 4 个验潮站的资料(见图 3),将潮汐和潮流的模拟结果与实测数据进行比较。

2.1 潮位验证

本文利用了 2011-04 沙港头、大门、磐石、石砰四个验潮站实测水位资料对潮汐模拟结果进行了检验,从 4 个验潮站实测资料 and 对应模拟结果来看(图 4、表 1),吻合程度良好。由表 1 可见,模拟的潮汐调和常数和实测符合良好, M_2, S_2, N_2, K_1 和 O_1 五个主要分潮的振幅绝均差和迟角绝均差分别为 4.84 cm 和 5.14°, 2.19 cm 和 3.35°, 5.18 cm 和 4.38°, 0.64 cm 和 3.67°, 0.59 cm 和 4.61°。4 个验潮站模拟潮位与实测水位表现出了较好的一致性,其均方根误差分别为 8.91, 14.85, 8.93 和 10.78 cm。从水位过程曲线可以看出 1 d 之内出现 2 次高潮和 2 次低潮,表现为半日潮的性质,同时也清楚的表现出月不等现象,1 个月内出现 2 次大潮和 2 次小潮。大潮潮差约 6.0 m,小潮潮差约为 1.8 m。4 个站的水位验证结果表明,数值模拟结果较好地再现了温州近海真实的潮位变化情况。

表 1 M_2, S_2, K_1, O_1 和 N_2 分潮振幅和迟角观测值与计算值的差值比较(振幅/cm,迟角/°)

Table 1 Observed and calculated tidal amplitudes and phases of M_2, S_2, K_1, O_1 and N_2 tides at four sites

站 位	M_2		S_2		K_1		O_1		N_2	
	振幅差	迟角差	振幅差	迟角差	振幅差	迟角差	振幅差	迟角差	振幅差	迟角差
沙港头	7.93	10.50	-3.87	-6.04	-0.41	-6.82	-0.54	5.34	-6.53	-1.14
大 门	1.36	3.25	-3.57	-0.48	0.14	0.77	-0.06	3.01	-3.92	1.71
磐 石	8.77	4.02	-1.19	-3.27	1.12	0.44	-1.33	6.74	-9.79	2.56
石 砰	-1.30	2.79	0.13	-3.60	0.90	6.65	-0.41	3.33	-0.48	12.12
绝均差	4.84	5.14	2.19	3.35	0.64	3.67	0.59	4.61	5.18	4.38

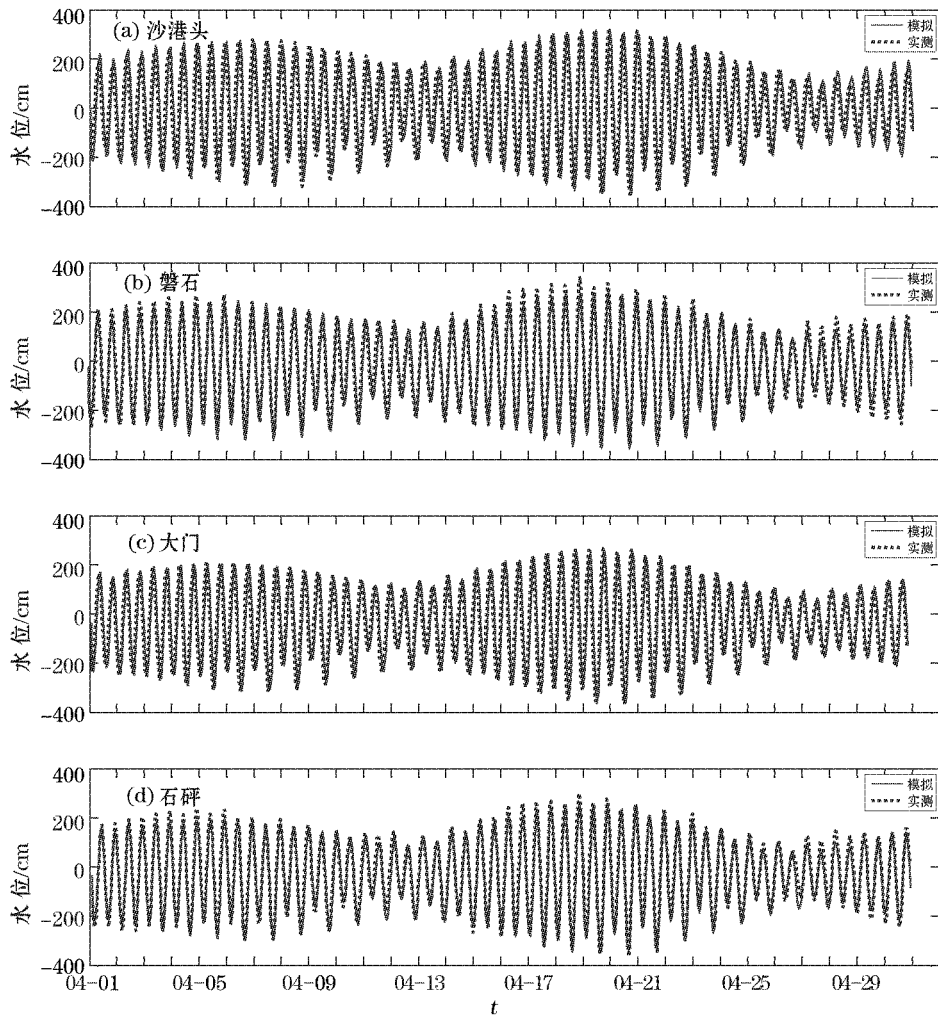


图 4 各验潮站计算水位与实测水位的比较

Fig. 4 Calculated and measured water elevations at Shagangtou, Panshi, Damen, and Shipeng

2.2 潮流验证

本文共收集了 9 个实测潮流连续站位资料, 站位分布见图 3, 验证均采用表层流速(图 5), 其他层的对比结果基本相似。从图中可以看出, 模拟潮流与实测潮流有良好的一致性, 能够较准确地模拟出涨急和落急的流速及对应的时刻。模拟与实测之间的差异, 主要表现为模拟流向变化较实测更显平稳。存在此差异可能是模式没考虑海面风及斜压等其他动力过程所致。9 个站位表层流速东分量和北分量的模拟值与实测值的相关分析结果见表 2, 呈显著相关, 流速与流向绝对均差分析结果见表 3。流速流向的验证结果表明, 模拟结果很好地反映了温州近海潮流时空变化特征。

表 2 潮流站观测值与计算值的相关系数

Table 2 Correlation between the observed and the calculated tidal currents

潮流分量	wz1	wz2	wz3	wz4	wz5	wz6	wz7	wz8	wz9	平均
u	0.62	0.91	0.97	0.96	0.95	0.89	0.96	0.90	0.65	0.87
v	0.96	0.97	0.95	0.98	0.97	0.97	0.98	0.86	0.97	0.96

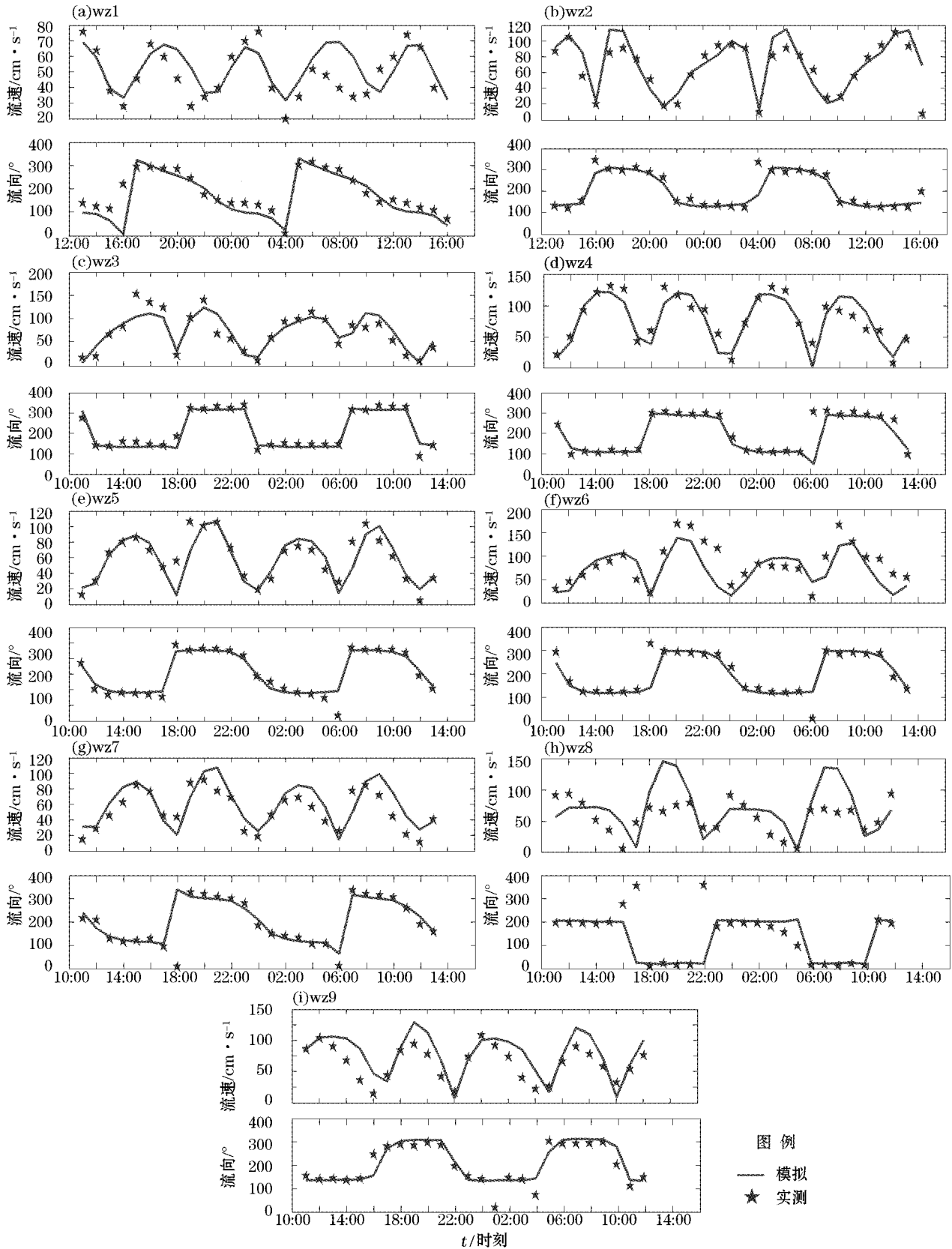


图 5 各站实测潮流与计算潮流的比较

Fig. 5 Calculated and measured tidal current velocity at nine stations

表 3 流速和流向观测值与模拟值的绝对均差

Table 3 Observed and calculated velocity and direction of flow at nine stations

站 位	wz1	wz2	wz3	wz4	wz5	wz6	wz7	wz8	wz9	平均
流速绝对均差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	11.20	9.90	10.35	10.17	10.87	12.40	13.94	15.24	11.38	11.71
流向绝对均差/ $^{\circ}$	8.92	10.23	8.83	10.12	10.70	9.47	8.75	10.10	9.87	9.66

3 温州近海潮波分布

鉴于上节模拟结果的验证,表明模拟结果与实测情况均符合良好。本节对温州海域的潮汐和潮流的分布及特征进行了分析,给出了该区域的潮汐同潮图及潮流椭圆图等。

3.1 潮汐分布

3.1.1 潮汐类型

本文采用 $F=(H_{O_1}+H_{K_1})/(H_{M_2})$ 作为潮汐类型的判别系数,它反映了日分潮与半日分潮的相对重要性^[15]。根据值的大小,一般可把潮汐分为 4 种类型: $0 < F \leq 0.5$ 为规则半日潮类型; $0.5 < F \leq 2.0$ 为不规则半日潮类型; $2.0 < F \leq 4.0$ 为不规则全日潮类型; $F > 4.0$ 为规则全日潮类型。由图 6 可见,温州近海的潮汐类型判断参数 F 最大为 0.3,均不超过 0.5,全海域表现为规则半日潮类型。其潮位变化特点为:在一个太阴日内,有两次高潮和两次低潮,从高潮到低潮和从低潮到高潮的潮差几乎相等。

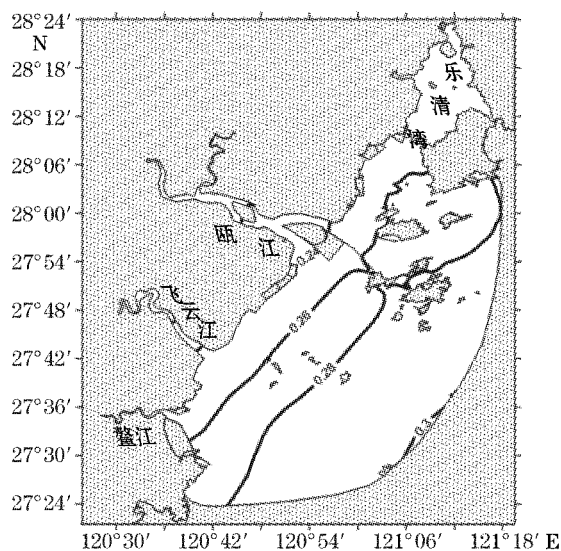


图 6 研究海域潮汐类型判别系数分布

Fig. 6 Distributions of tide type discriminant factors

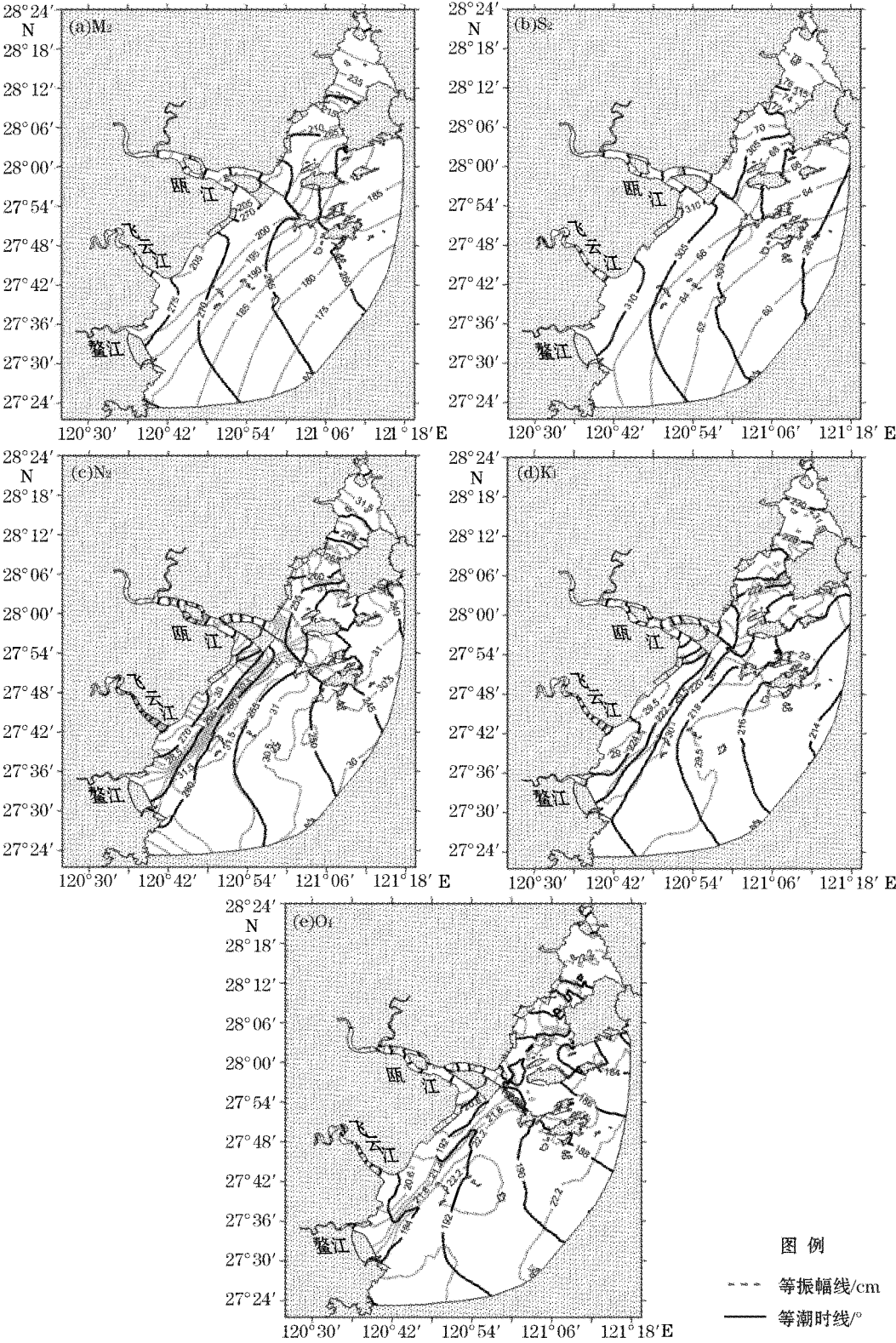


图 7 研究区 5 个主要分潮同潮图

Fig. 7 Co-tidal charts of the simulated M_2 , S_2 , N_2 , K_1 and O_1 .
Dash lines are co-amplitudes and solid lines are co-phases

3.1.2 同潮时线和等振幅线

模式计算所得到的温州近海 5 个分潮 M_2 , S_2 , N_2 , K_1 和 O_1 的同潮图见图 7。 M_2 分潮所占比重最大, S_2 与 N_2 次之, K_1 与 O_1 相当。 M_2 , S_2 和 N_2 分潮同潮时线的走向基本一致。

在 M_2 同潮图中, 265° 左右同潮时线以霓屿岛为定点, 呈八字形向两旁延伸。图中 S_2 的 300° 左右同潮时线和 N_2 的 255° 左右同潮时线呈类似分布。同潮时线的这一分布特征表明: 半日潮波传播到霓屿岛以后, 开始分为南北两支传播。 M_2 和 S_2 分潮最大振幅出现在乐清湾内, 由湾口至湾顶振幅逐渐增大, M_2 分潮振幅值可达 235 cm 以上, S_2 分潮振幅值能达到 78 cm 以上, N_2 分潮振幅值则达到 31.5 cm 以上。 K_1 , O_1 分潮等振幅线分布大致相似, 两者的振幅由东向西略有增大, 但幅度增长有限。 K_1 , O_1 同潮时线分布基本与 M_2 , S_2 相同。模拟结果与陈倩等^[1] 的浙江近海潮汐数值模拟的振幅迟角分布规律基本一致。

3.2 潮流分布

3.2.1 潮流类型

与潮汐类型划分相类似, 采用 $F = (W_{O_1} + W_{K_1}) / (W_{M_2})$ 作为潮流类型的判断参数, 其中 W_{O_1} , W_{K_1} , W_{M_2} 分别为 O_1 , K_1 , M_2 分潮流的椭圆长轴^[15]。由图 8 可见, 绝大部分海域表层潮流 F 值在 0.15 左右, 均小于 0.50, 故温州近海属于规则半日潮流区。

3.2.2 运动方式

潮流的旋转特征由潮流椭圆旋转率 K 来决定。 K 值为最小潮流与最大潮流之比, 即椭圆短轴与长轴之比。并且规定, 若这个分潮流矢随时间的增加按逆时针方向旋转, K 算作正, 否则, 算作负^[14]。当 $K > 0.25$ 时, 潮流表现为旋转流; 而当 $K < 0.25$ 时, 潮流表现为往复流^[8]。由于研究区域内半日分潮具有支配地位, 所以我们以 M_2 分潮流旋转率 K 的分布情况来说明本区域的潮流旋转特征(图 9)。由图 9 可见, 在沿岸的河口、湾口水域等处大部分海域 K 的绝对值都小于 0.25, 呈明显的往复流性质, 主要受地形的限制和岸线的制约所致。在研究区域西南部海域 K 的绝对值大于 0.50, 呈旋转流, 方向为逆时针方向。

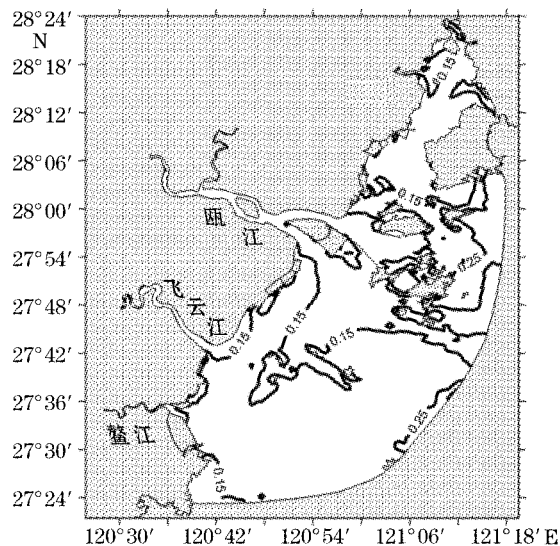


图 8 潮流类型判别系数的分布

Fig. 8 Types of tidal current type discriminant factors

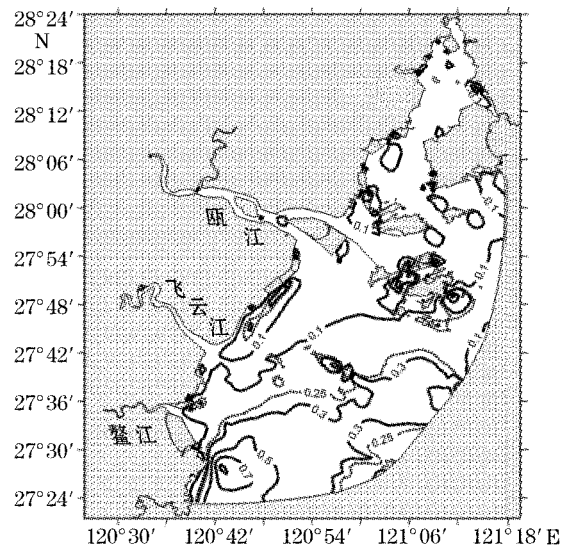


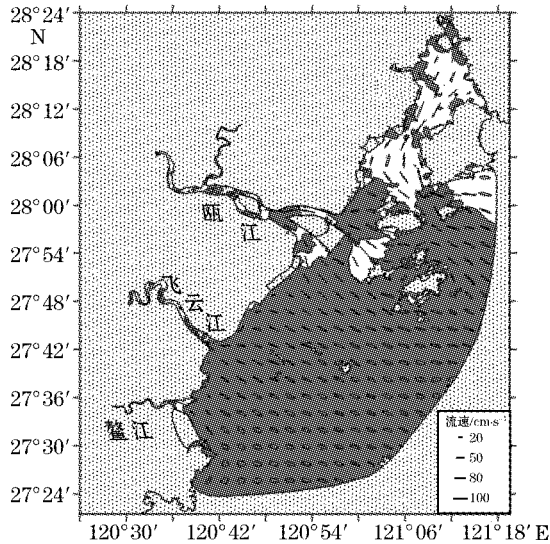
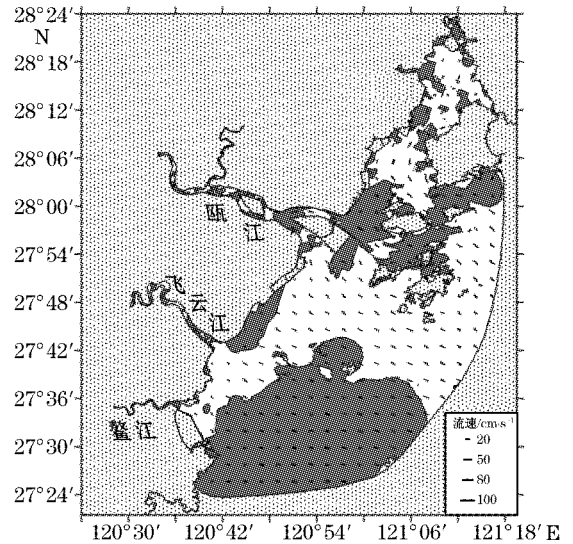
图 9 M_2 分潮流表层旋转率 K 的分布图(表层)

Fig. 9 Surface rotation rate K for M_2 tidal current

3.2.3 潮流椭圆长、短轴

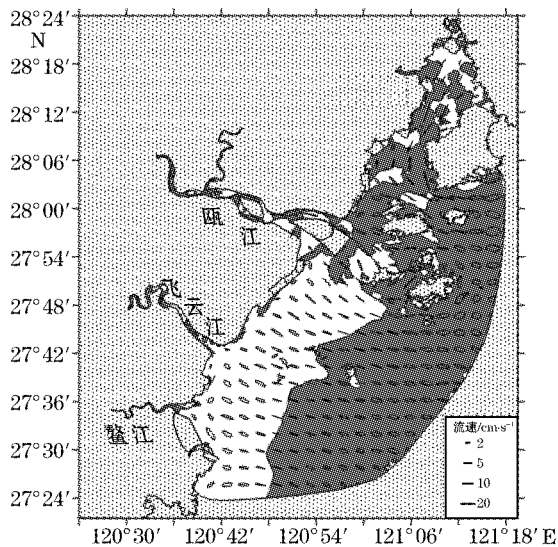
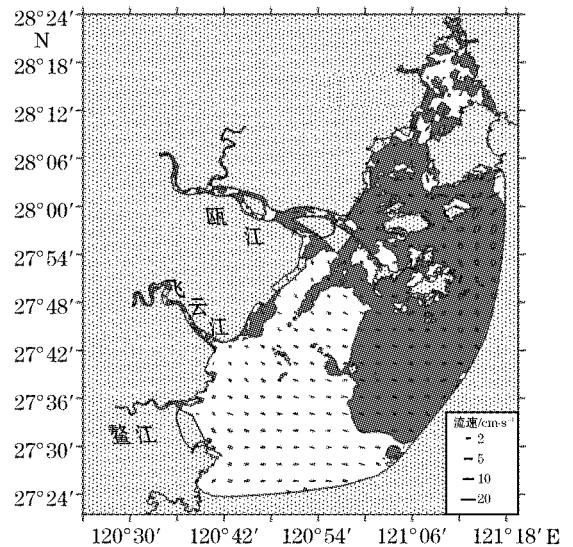
为了研究温州海区的潮流分布情况, 分别计算了 5 个分潮的潮流椭圆要素(长轴、短轴、倾斜角、格林威治迟角)。图 10~14 为主要半日分潮 M_2 , S_2 , N_2 和主要全日分潮 K_1 , O_1 的表层潮流椭圆长、短轴分布图, 阴

影海域代表潮流为逆时针方向旋转,无阴影海域则为顺时针旋转。分潮流椭圆长、短轴分布与地形有密切关系,在湾内或近岸海区,长轴方向一般与岸线平行,在湾口、河口指向湾里、河道,在南部沿岸则与岸线垂直,这可能与潮波行进方向及潮波的干涉有关。

图 10 M_2 分潮流椭圆Fig. 10 Current ellipses of M_2 图 11 S_2 分潮流椭圆Fig. 11 Current ellipses of S_2

由 M_2 分潮流椭圆图(图 10)可见,在乐清湾湾内、瓯江口海域流速普遍较大,最大流速可超过 100 cm/s。而在研究区域的东南部流速基本都在 50~80 cm/s。整个温州海域 M_2 分潮流主要表现为逆时针旋转,仅在乐清湾等局部区域潮流为顺时针旋转。

S_2 分潮流椭圆与 M_2 相比,整体流速比 M_2 小,最大流速能够超过 50 cm/s,出现在乐清湾与瓯江河口位置。相对于 M_2 分潮流而言,在研究海域的中部, S_2 分潮流呈现大面积的顺时针旋转,其余海域基本与 M_2 分潮流特征一致。

图 12 N_2 分潮流椭圆Fig. 12 Current ellipses of N_2 图 13 K_1 分潮流椭圆Fig. 13 Current ellipses of K_1

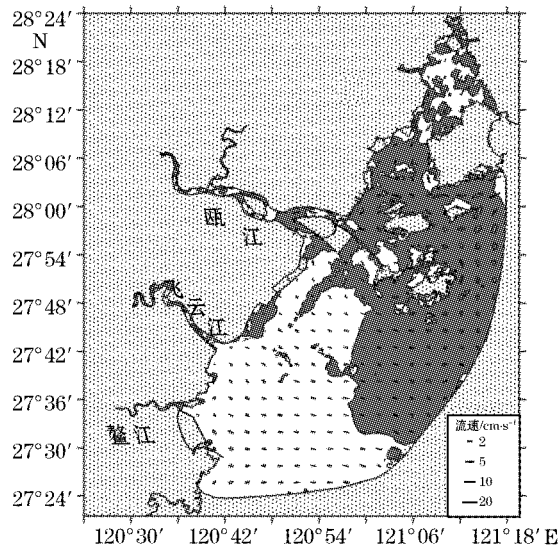
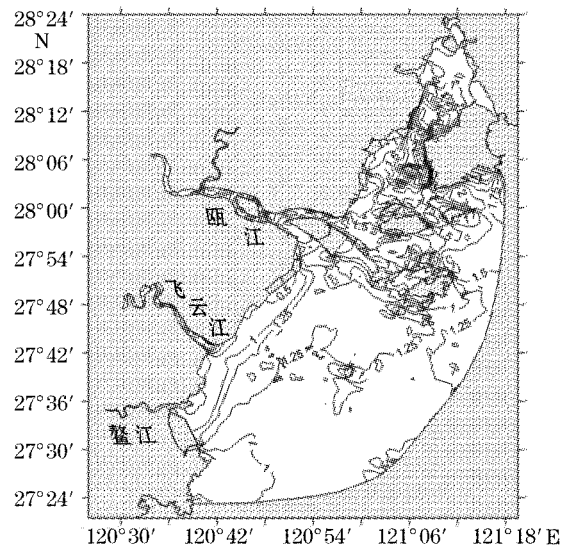
图 14 O_1 分潮流椭圆Fig. 14 Current ellipses of O_1 

图 15 最大可能流速

Fig. 15 The maximum possible tidal current velocity

对于 N_2 分潮而言,流速相对于 M_2 , S_2 分潮流小很多,最大流速出现在乐清湾与瓯江口海域附近,流速约 20 cm/s。在乐清湾、瓯江口以及东部海域 N_2 分潮流逆时针旋转明显,而飞云、鳌江及周边海域顺时针旋转明显。

由 K_1 分潮流椭圆图与 N_2 分潮流椭圆图比较可见, K_1 分潮流的流速比 N_2 略小,最大流速不超过 20 cm/s,出现在乐清湾与瓯江口海域内。

与 M_2 , S_2 , N_2 和 K_1 相比, O_1 分潮流流速是最小的。同样在乐清湾与瓯江口海域出现最大流速,其值超过 10 cm/s。东北部区域 O_1 分潮主要呈逆时针旋转,西南部呈顺时针旋转。

为了对温州近海潮流的大小有一个总体的了解,图 15 绘制了最大可能流速分布图。最大可能流速是根据潮流调和常数计算所得。由《港口工程技术规范》^[16] 知,对于规则半日潮海域,其最大可能流速计算公式为

$$\vec{V}_{\max} = 1.29\vec{W}_{M_2} + 1.23\vec{W}_{S_2} + \vec{W}_{K_1} + \vec{W}_{O_1} \quad (2)$$

式(2)中, $\vec{W}_{M_2}$, $\vec{W}_{S_2}$, $\vec{W}_{K_1}$, $\vec{W}_{O_1}$ 分别为 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 四个分潮流的椭圆长半轴矢量。由图可知,最大可能的流速分布基本与等深线一致,强的潮流主要出现在陆架浅水区和狭窄的河口或湾口附近海域。这表明最大可能流速的变化趋势主要受该海域水深、岸线和地形等因素的综合影响^[15]。水深变化平缓的开阔海域,最大可能潮流流速均在 1.25 m/s 左右,在乐清湾玉环岛与大门岛之间的最大可能潮流流速最大,可达 2.0 m/s。

4 结 论

本文基于 FVCOM 海洋数值模式,采用非结构三角形网格进行计算海域水平网格设置,运用干/湿网格技术对潮间带进行处理,将温州近海作为一个整体建立并模拟了温州近海的潮汐和潮流,模拟结果较好地刻画了研究海域的潮汐潮流规律。

在潮汐方面:模拟的 M_2 , S_2 , N_2 , K_1 和 O_1 五个主要分潮的振幅和迟角与观测符合较好,绝均差分别为 4.84 cm 和 5.14°, 2.19 cm 和 3.35°, 5.18 cm 和 4.38°, 0.64 cm 和 3.67°, 0.59 cm 和 4.61°;研究海区潮汐属规则半日潮; M_2 , S_2 和 N_2 分潮最大振幅出现在乐清湾,由湾口向湾顶渐增, M_2 分潮最大振幅可达到 2.4 m, S_2 分潮最大振幅能超过 0.7 m, N_2 分潮振幅值则达到 0.3 m; K_1 , O_1 分潮等振幅线分布大致相似,振幅值比 M_2 , S_2 小。

在潮流方面:本文模拟的潮流与实测潮流具有良好的一致性,能够较准确地模拟出涨急和落急的流速及对应的时刻;研究海区属规则半日潮流区; M_2 分潮流在乐清湾内、瓯江口海域流速普遍较大,最大流速超过 1.0 m/s , S_2 分潮流整体流速比 M_2 小,最大流速可以达到 0.5 m/s 以上, O_1 是 5 个分潮里面分潮流流速最小的;最大可能的流速分布基本与等深线一致,强的潮流主要出现在陆架浅水区和狭窄的河口或湾口附近海域,最大可能潮流流速均大于 1.2 m/s ,其中在乐清湾玉环岛与大门岛之间的最大可能流速最大,可超过 2.0 m/s 。

考虑到近岸海域的岸线和地形复杂,在本文模式构建过程中,尽量收集覆盖研究区域的海图资料,但由于受围填海工程、泥沙入海等的影响,水深岸线存在一定的变动,而本文收集的温州近海海图资料,时间跨度较大,出版时间范围为 1999-07—2004-07,水深测量时间范围为 1964—2003 年。下一步工作将按年代分析温州近海潮波状况,并研究水深岸线变化对海洋动力环境的影响。

另外,本模型模拟分析了正压条件下的潮汐潮流变化规律,接下来将在该动力环境背景下,进一步考虑径流影响及泥沙冲淤变化等。

参考文献(References):

- [1] CHEN Q, HUANG D J, ZHANG B Z. Numerical simulation of tide and tidal currents in the seas adjacent to Zhejiang[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(5): 9-20. 陈倩, 黄大吉, 章本照. 浙江近海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 2003, 25(5): 9-20.
- [2] CHEN Q, HUANG D J, ZHANG B Z, et al. The research of the tidal features in the coastal zone of Zhejiang Province[J]. Donghai Marine Science, 2003, 2(12): 1-12. 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等. 浙江近海潮汐的特征[J]. 东海海洋, 2003, 2(12): 1-12.
- [3] CHEN Q, HUANG D J, ZHANG B Z, et al. Characteristics of the tidal current and residual current in the seas adjacent to Zhejiang[J]. Donghai Marine Science, 2003, 21(4): 1-12. 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等. 浙江近海潮流和余流的特征[J]. 东海海洋, 2003, 21(4): 1-12.
- [4] LI M G, WANG Z L. Tidal flow numerical simulation of Oujiang Estuary[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(2): 19-22. 李孟国, 王正林. 瓯江口潮流数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(2): 19-22.
- [5] LI M G, WEN C P, CAI Y. Advances in research and development in Wenzhou sea area[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33(4): 277. 李孟国, 温春鹏, 蔡寅. 温州海域研究与开发进展[J]. 水道港口, 2012, 33(4): 277.
- [6] LI M G, SHI Z, FAN W J. Tidal flow numerical simulation study on the reclamation project of Beiao Houtu of Dongtou Island[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(1): 1-7. 李孟国, 时钟, 范文静. 瓯江口外洞头岛北岙后涂围垦工程的潮流数值模拟研究[J]. 海洋通报, 2005, 24(1): 1-7.
- [7] ZHENG J Y, LI M G, MAI M, et al. Hydrographic and sediment analyses of the Oujiang estuary[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 19(1): 1-7. 郑敬云, 李孟国, 麦苗, 等. 瓯江口水文泥沙特征分析[J]. 水道港口, 2008, 29(1): 1-7.
- [8] 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. 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.
- [9] LIN Z L, ZHU X M, BAO X W, et al. Three-dimensional tide and tidal current numerical simulation based on FVCOM in Quanzhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(1): 15-24. 林作梁, 朱学明, 鲍献文, 等. 基于 FVCOM 的泉州湾海域三维潮汐与潮流数值模拟[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 15-24.
- [10] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model FVCOM user manual[R]. North Dartmouth: UMASSD, 2006: 6-8.
- [11] SONG D H, BAO X W, ZHU X M. Three-dimensional numerical simulation of tidal current in Qinzhou Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(2): 7-14. 宋德海, 鲍献文, 朱学明. 基于 FVCOM 的钦州湾三维潮流数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(2): 7-14.
- [12] TENG F, FANG G H, WANG X Y, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the Indonesian adjacent seas[J]. Advances In Marine Science, 2013, 31(2): 166-179. 腾飞, 方国洪, 王新怡, 等. 印度尼西亚近海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(2): 166-179.
- [13] 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. 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.
- [14] PAWLOWIC R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE

- [J]. *Computers and Geosciences*, 2002, 28(8): 929-937.
- [15] FANG G H, ZHENG W Z, CHEN Z Y, et al. Analysis and prediction of tides and tidal currents[M]. Beijing: Ocean Press, 1986: 10-11. 方国洪, 郑文振, 陈宗铺, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 10-11.
- [16] MINISTRY OF TRANSPORT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Chinese specification of harbour engineering(I)[M]. Beijing: China Communications Press, 1987. 中华人民共和国交通部. 港口工程技术规范(上册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.

Numerical Simulation of Tide and Tidal Currents in the Wenzhou Offshore Based on FVCOM

YUE Yun-fei¹, WANG Yong-gang^{2,3}, HE Shan-fang⁴, WANG Yi-hang¹, WEI Ze-xun^{2,3}

(1. *Ningbo University Faculty of Science*, Ningbo 315211, China;

2. *The First Institute of Oceanography*, SOA, Qingdao 266061, China;

3. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling*, SOA, Qingdao 266061, China;

4. *Marine Environmental Monitoring Centre of Ningbo*, SOA, Ningbo 315012, China)

Abstract: Based on the finite-volume coastal ocean numerical model (FVCOM), a tidal model is established for the Wenzhou offshore. The computational domain covers ($120^{\circ}24'00'' \sim 121^{\circ}19'12''\text{E}$, $27^{\circ}21'00'' \sim 28^{\circ}24'00''\text{N}$). The horizontal resolution is 50 m at the near shore and increase to 2 km gradually. Five principal tidal constituents, M_2 , S_2 , N_2 , K_1 and O_1 , are simulated and analyzed. The model results are compared with observation, showing a satisfactory agreement. Comparing with 4 tidal gauge stations, the mean absolute difference in amplitude and phase-lag are respectively 4.84 cm and 5.14° for M_2 , 2.19 cm and 3.35° for S_2 , 5.18 cm and 4.38° for N_2 , 0.64 cm and 3.67° for K_1 and 0.59 cm and 4.61° for O_1 . Comparing with 9 currents observation stations, the mean absolute difference in speed is 11.71 cm/s and the mean absolute difference in direction is 9.66° . Based on model outputs, the distributions of co-tidal charts, tidal current ellipses, tide and tidal current types, and the maximum possible tidal current, are given.

Key words: FVCOM; Wenzhou offshore; tide; tidal current

Received: September 17, 2014