

瓯江河口潮流水动力场数值模拟

缪吉伦¹, 赵万星^{2*}

¹重庆交通大学西南水运工程研究所, 重庆

²重庆市计量质量检测研究院, 重庆

Email: jimcqu@163.com, *58314047@qq.com

收稿日期: 2020年8月25日; 录用日期: 2020年9月11日; 发布日期: 2020年9月18日

摘要

针对瓯江口的复杂地形和强潮条件, 建立了正交曲线坐标系下的3D、非恒定瓯江口潮流水动力学模型, 研究了瓯江口在径流与潮汐共同作用下的水动力学特点。模型区域梅岱至洞头长约80 Km, 计算网格8693个。模型应用2010年大、中和小潮条件, 对8个站点潮位及6个站点的流场进行了验证, 模拟了不同潮汐和径流条件下的潮位及水动力场变化。模型值与实测值吻合较好, 模型有较好适应性, 能满足波浪作用下的瓯江口水动力研究, 并可用于模拟建筑物对水动力场的影响。

关键词

瓯江, 潮汐, 径流, 水动力场, 数值模拟

Numerical Simulation of Tide Hydrodynamic Field in Oujiang Estuary

Jilun Miao¹, Wanxing Zhao^{2*}

¹Southwest Research Institute for Waterway Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

²Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing

Email: jimcqu@163.com, *58314047@qq.com

Received: Aug. 25th, 2020; accepted: Sep. 11th, 2020; published: Sep. 18th, 2020

Abstract

Considering the complex topography and strong tide conditions of Oujiang Estuary, the 3D, time-

*通讯作者。

文章引用: 缪吉伦, 赵万星. 瓯江河口潮流水动力场数值模拟[J]. 力学研究, 2020, 9(3): 115-122.

DOI: 10.12677/ijm.2020.93013

dependent hydrodynamic model under orthogonal curvilinear coordinate system was established, and the characteristics of the interaction of runoff and tide in Oujiang Estuary was studied. The length of the model area from Mei'ao to Dongtou is about 80 km, with 8693 computational grids. The model was applied to verify the flow field of 8 stations and 6 stations under the conditions of spring, middle and neap tides in 2010, and simulated the changes of tidal level and hydrodynamic field under different tidal and runoff conditions. The model values are in good agreement with the measured values, and the model has good adaptability. It can be used to simulate the influence of buildings on hydrodynamic field.

Keywords

Oujiang River, Tide, Runoff, Hydrodynamic Field, Numerical Simulation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 研究背景

瓯江口位于浙江东南部、北纬 27°~28°、东经 119°~121°之间,是浙江第二大河流瓯江的入海口,也是重要的沿海经济带(如图 1)。近年来,随着地区经济发展和航运业发展,研究瓯江口水动力条件和波流特征对开展航运基础设施建设具有十分重要的意义,并取得了一些研究成果[1] [2] [3]。影响瓯江河口水动力场的因素很多,主要包括:1) 河口区域的复杂地形。口门往上形成了灵昆岛、江心屿、七都岛等江心洲,河道分汊呈藕节状。2) 潮汐条件和径流变化。受瓯江干流、楠溪江径流及潮流耦合叠加影响。3) 盐度变化和风应力因素。受台风及咸水入侵作用,对泥沙絮凝淤积有一定影响。4) 人工建筑物对水动力场的影响,沿江分布有众多码头、船厂、丁坝、桥梁等水工建筑物[4]。本文针对瓯江口复杂地形和强潮条件,建立了瓯江口 3D、非恒定水动力模型,模型基于正交曲线网格,研究瓯江口在径流与潮汐共同作用下的水动力学特点,并研究了不同潮汐和径流条件下水动力场分布。

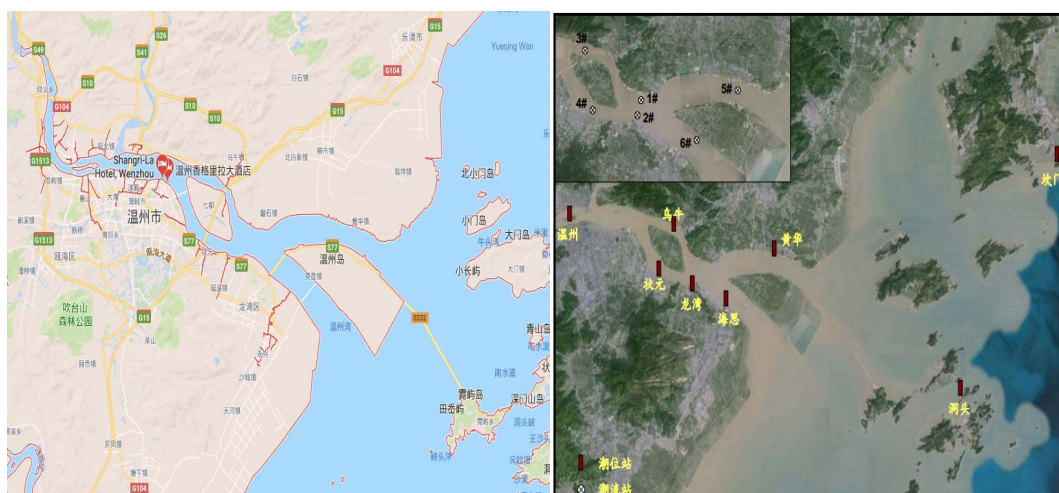


Figure 1. Sketch of Oujiang estuary (a) and site distribution (b)
图 1. 瓯江口地形图(a)和站点分布图(b)

2. 数学模型的建立

2.1. 模型方程

垂向 σ 坐标变化有:

$$z = (z^* + h) / (\zeta + h) \tag{1}$$

这里: *代表原始物理坐标, h 和 ζ 是河底高程和水位。

在静水压、Boussinesq、垂向正压条件下, 基本方程由不可压、变密度流的动量方程、连续方程和温度、盐度输运方程组成[5] [6]:

$$\partial_t (m_x m_y H) + \partial_x (m_y Hu) + \partial_y (m_x Hv) + \partial_z (m_x m_y w) = Q_H \tag{2}$$

$$\begin{aligned} &\partial_t (m_x m_y Hv) + \partial_x (m_y Hu v) + \partial_y (m_x H v v) + \partial_z (m_x m_y w v) + m_x m_y f_e Hu \\ &= -m_x H \partial_y (p + g\eta) - m_x (\partial_y h - z \partial_y H) \partial_z p + \partial_z (m_x m_y H^{-1} A_v \partial_z u) + Q_v \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &\partial_t (m_x m_y Hu) + \partial_x (m_y H u u) + \partial_y (m_x H v u) + \partial_z (m_x m_y w u) - m_x m_y f_e Hv \\ &= -m_y H \partial_x (p + g\eta) - m_y (\partial_x h - z \partial_x H) \partial_z p + \partial_z (m_x m_y H^{-1} A_v \partial_z u) + Q_u \end{aligned} \tag{4}$$

$$\partial_z p = -gHb = -gH(\rho - \rho_0) \rho_0^{-1} \tag{5}$$

$$\partial_t (m\xi) + \partial_x \left(m_y H \int_0^1 u dz \right) + \partial_y \left(m_x H \int_0^1 v dz \right) = 0 \tag{6}$$

$$\rho = \rho(S, T) \tag{7}$$

$$\partial_t (mHS) + \partial_x (m_y HuS) + \partial_y (m_x HvS) + \partial_z (mwS) = \partial_z (mH^{-1} A_b \partial_z S) + Q_S \tag{8}$$

$$\partial_t (mHT) + \partial_x (m_y HuT) + \partial_y (m_x HvT) + \partial_z (mwT) = \partial_z (mH^{-1} A_b \partial_z T) + Q_T \tag{9}$$

式中, u, v, w 是三个方向流速, $H = \zeta + h$ 是水深, m_x, m_y 是坐标变化张量, $m = m_x m_y$, f 是 Coriolis 系数, $m_x m_y f_e \equiv m_x m_y f - u \partial_y m_x + v \partial_x m_y$, 压力 $p = \rho_0 gH(1 - z)$, ρ_0 是参考密度; 密度 ρ 是温度 T 和盐度 S 的函数, 在不可压、滞弹性假定下(Mellor, 1991, Clark 和 Hall, 1991), 也可以是压力的弱函数; 浮力 b 定义为垂向密度与参考密度 ρ_0 的相对偏离。 A_v, A_b 是垂向紊动粘度和扩散率, 联立求解(2)~(8)式可得变量 $u, v, w, P, \zeta, \rho, S, T$ 。

垂向紊动动量扩散率(A_v)和质量传输系数(A_b), 可采用 M-Y (1982)方程求解。方程定义湍流强度 q^2 、湍流尺度 l 和 Richardson 数 R_q 。

$$A_v = \phi_v q l = 0.4(1 + 36R_q)^{-1} (1 + 6R_q)^{-1} (1 + 8R_q) q l \tag{10}$$

$$A_b = \phi_b q l = 0.5(1 + 36R_q)^{-1} q l \tag{11}$$

$$R_q = \frac{gH \partial_z b}{q^2} \frac{l}{H^2} \tag{12}$$

ϕ_b, ϕ_v 称为稳定函数, 用于在稳定和非稳定密度分层下, 减小或增强垂向混合和输运。

正交曲线坐标系下, 垂向无量纲化, 采用 σ 坐标:

$$\begin{aligned} &\partial_t (mHq^2) + \partial_x (m_y Huq^2) + \partial_y (m_x Hvq^2) + \partial_z (mwq^2) \\ &= \partial_z (mH^{-1} A_q \partial_z q^2) - 2mH (B_l l)^{-1} q^3 + 2m \left(H^{-1} A_v \left((\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2 \right) + \eta_p c_p D_p (u^2 + v^2)^{3/2} + gK_v \partial_z b \right) + Q_q \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 & \partial_t(mHq^2l) + \partial_x(m_yHuq^2l) + \partial_y(m_xHvq^2l) + \partial_z(mwq^2l) \\
 & = \partial_z(mH^{-1}A_q\partial_zq^2l) - mHB_1^{-1}q^3 \left(1 + E_2 \left(\frac{l}{\kappa Hz} \right)^2 + E_3 \left(\frac{l}{\kappa H(1-Z)} \right)^2 \right) \\
 & \quad + 2mH^{-1}E_1lA_v \left((\partial_zu)^2 + (\partial_zv)^2 + \eta_p c_p D_p (u^2 + v^2)^{3/2} + gK_v \partial_z b \right) + Q_t
 \end{aligned} \tag{14}$$

式中, 经验常数 $(E_1, E_2, E_3) = (1.8, 1.33, 0.25)$ 。

2.2. 边界条件

平面边界条件: 进出边界采用开边界, 河岸及固定建筑物采用固壁边界。

风剪应力有下式:

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = c_s \sqrt{U_W^2 + V_W^2} (U_W, V_W) \tag{15}$$

剪切系数

$$c_s = 0.001 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(0.8 + 0.065 \sqrt{U_W^2 + V_W^2} \right) \tag{16}$$

U_W 和 V_W 是水面风速, ρ_a, ρ_w 是大气和水的密度。

河床底部的剪切力:

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_b \sqrt{u_1^2 + v_1^2} (u_1, v_1) \tag{17}$$

下标 1 表示底层水体流速, 假定近床流场剖面满足对数分布, 则

$$c_b = \left(\frac{\kappa}{\ln(\Delta_1/2z_o)} \right)^2 \tag{18}$$

式中 κ 是 von Karman 常数, Δ_1 是底层厚度, $z_o = z_o^*/H$ 是无量纲糙度高度。

2.3. 计算网格

模型区域如图 1, 上起瓯江梅岱, 下至洞头岛, 全长约 80 km。模型计算网格采用正交贴体网格, $i \times j$ 为 233×97 , 共采用了 8693 个格点, 如图 2。

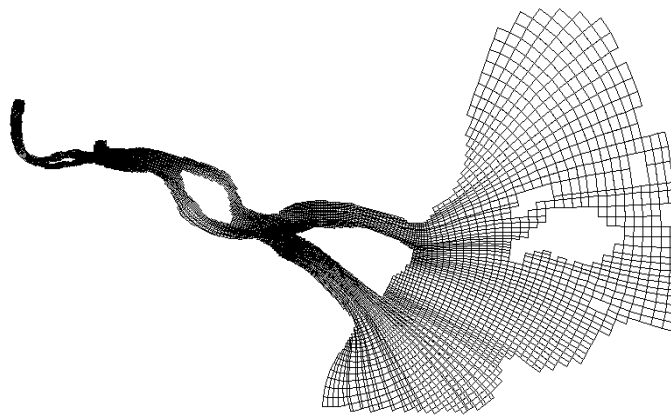


Figure 2. The computational grid ($I \times J = 233 \times 97$)
图 2. 计算网格($I \times J = 233 \times 97$)

3. 模型验证

模型验证采用 2010 年大、中、小潮条件下, 以温州、状元、龙湾、乌牛、海思、黄华、洞头和坎门等 8 个站点潮位与 1#~6# 共 6 个站点的流场观测值与模拟值对比得出。站点位置见图 1(b)。

潮位校准采用了温州、状元、龙湾、乌牛、海思、黄华、洞头和坎门等 8 个站点潮位进行比较。如下图 3~5, 圆点代表观测值, 实线代表模拟值。大潮条件下, 潮位观测值与模拟值之差平均值最大为 0.1 m, 最小为 0.01 m, 均方根误差 RSME 最大为 0.15 m, 最小为 0.03 m; 中潮条件下, 潮位观测值与模拟值之差平均值最大为 0.08 m, 最小为 0.01 m, 均方根误差 RSME 最大为 0.11 m, 最小为 0.04 m; 小潮条件下, 潮位观测值与模拟值之差平均值最大为 0.1 m, 最小为 0.01 m, 均方根误差 RSME 最大为 0.15 m, 最小为 0.03 m。

流速观测值与模拟值之差平均值最大为 0.12 m/s, 最小为 0.03 m/s, 计算结果与观察值吻合良好。

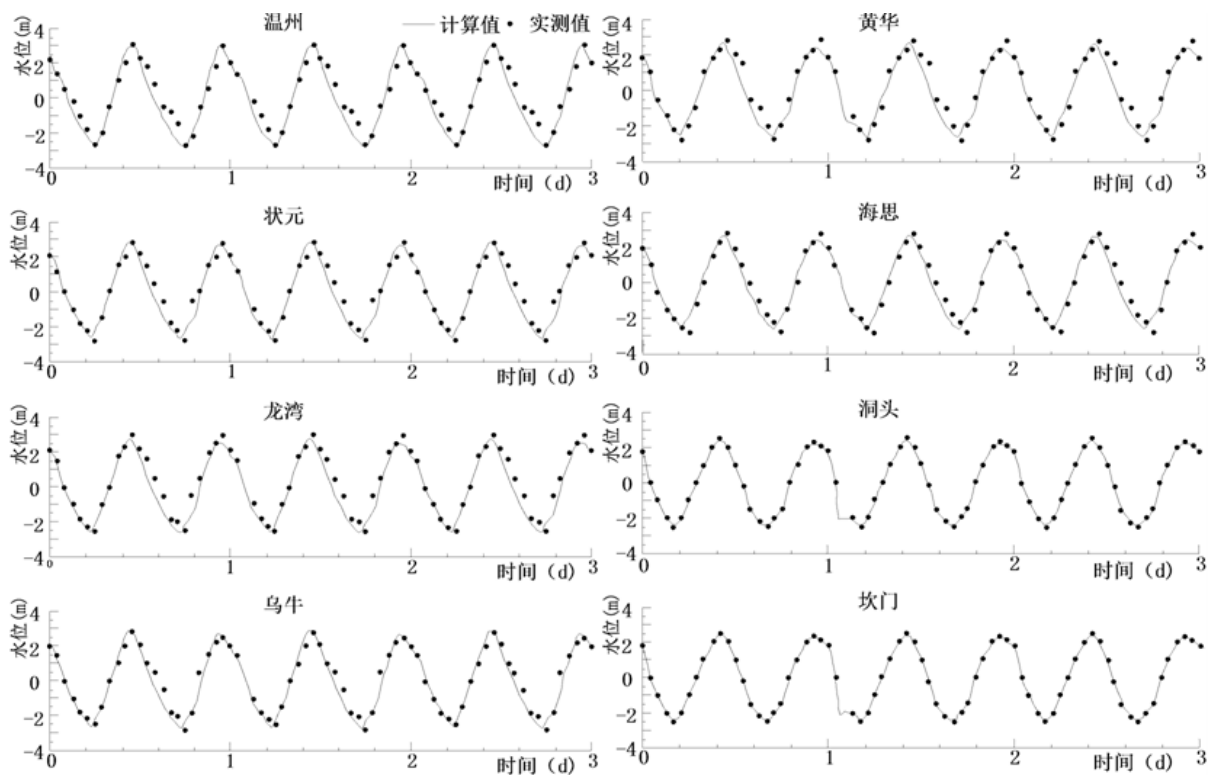
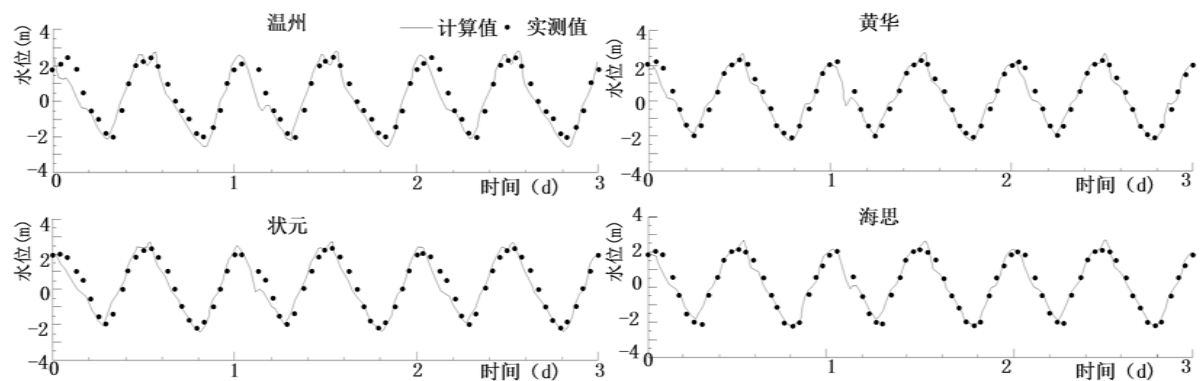


Figure 3. Comparisons of observed and simulated values at different stations under high-tide

图 3. 大潮下的各站点观测值和模拟值比较图



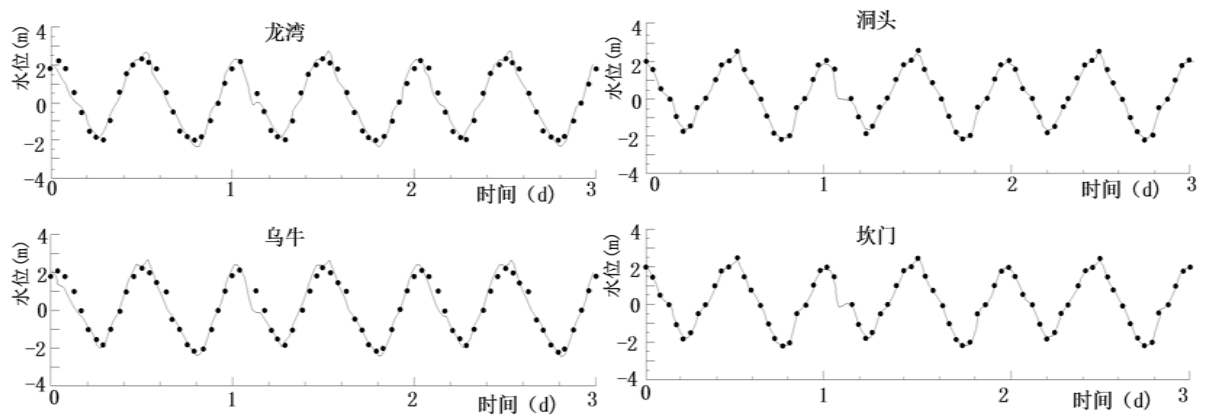


Figure 4. Comparisons of observed and simulated values at different stations under mid-tide
图 4. 中潮下的各站点观测值和模拟值比较图

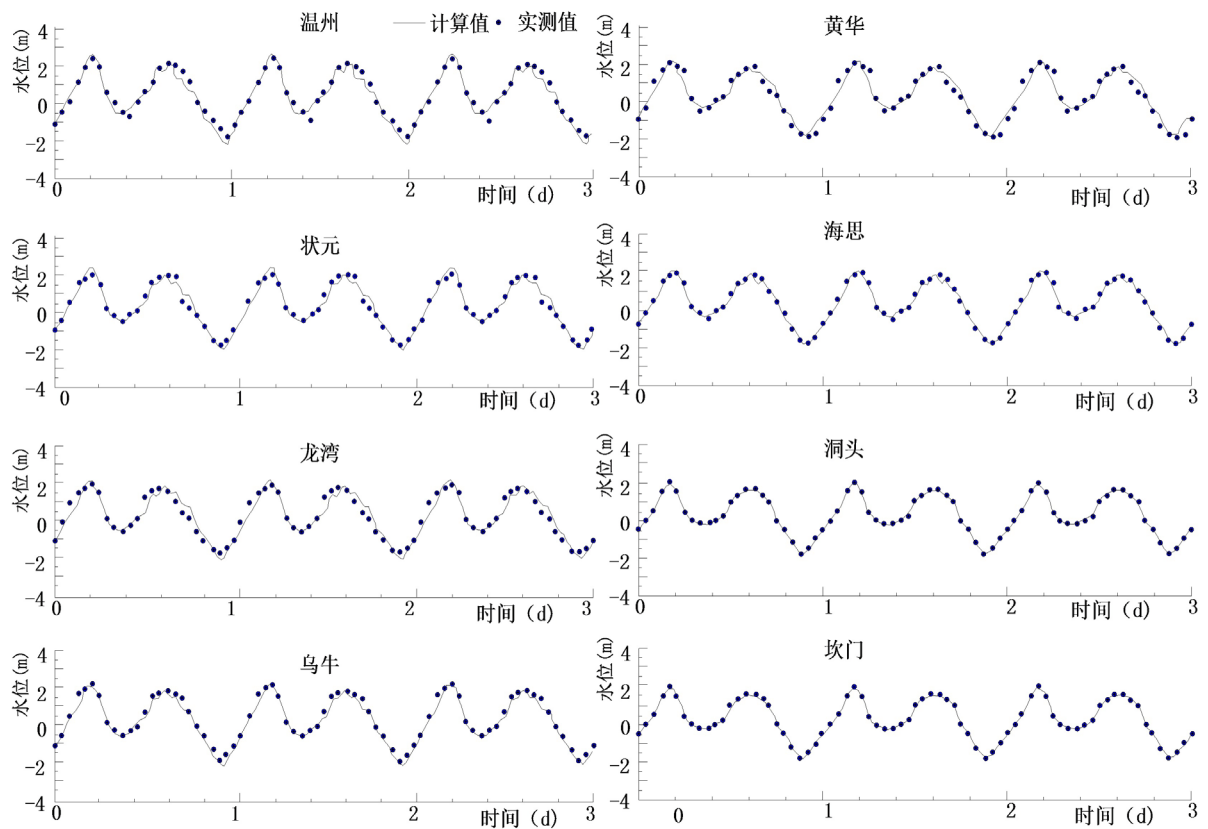


Figure 5. Comparisons of observed and simulated values at different stations under low-tide
图 5. 小潮下的各站点观测值和模拟值比较图

4. 模型应用

4.1. 潮差

对模型结果进行分析, 可以得出瓯江口河段在不同径流和潮汐状态下的潮差, 如下表 1, 潮位和潮差是研究河口水动力的基础, 对于认识其河口水动力状况具有重要意义。

Table 1. Statistics on tidal range of each station (unit: m)
表 1. 各站点潮差统计表(单位: m)

站名	大潮			中潮			小潮		
	最低潮位	最高潮位	潮差	最低潮位	最高潮位	潮差	最低潮位	最高潮位	潮差
江心寺	-2.87	3.26	6.12	-2.56	3.38	5.94	-2.18	2.66	4.85
状元	-2.78	3.16	5.94	-2.50	2.93	5.43	-2.15	2.56	4.72
龙湾	-2.66	2.94	5.60	-2.38	2.74	5.12	-2.04	2.36	4.40
乌牛	-2.60	2.86	5.46	-2.31	2.77	5.08	-1.94	2.28	4.23
黄华	-2.65	2.96	5.62	-2.38	2.72	5.10	-2.03	2.40	4.43
海思	-2.62	2.70	5.32	-2.31	2.76	5.07	-1.95	2.12	4.08
洞头	-2.54	2.72	5.26	-2.27	2.76	5.03	-1.87	2.11	3.98
坎门	-2.47	2.47	4.93	-2.18	2.42	4.60	-1.78	1.96	3.74

4.2. 潮流场特征

大潮涨急、落急工况下流速场分布见图 6、图 7。根据计算结果, 工程海域流场特征表现为, 瓯江河段潮流受河道深槽地形控制, 基本上作往复运动。涨潮流向为 W~NW 向, 落潮流向为 SE~E 向。瓯江河口处在为强潮海区, 涨落潮流速较大, 且总体呈现落潮大于涨潮特点。七都岛段水域, 大潮情况下涨潮平均流速约介于 0.7~1.0 m/s, 涨潮最大流速约介于 1.1~1.6 m/s, 落潮平均流速约介于 0.9~1.3 m/s, 落潮最大流速约介于 1.2~1.9 m/s。七都岛北汊水域在大潮期间其平均流速约介于 0.8~1.2 m/s 之间, 最大流速约介于 1.1~1.7 m/s 之间。七都南汊水域在大潮期间其平均流速约介于 0.7~1.0 m/s 之间, 最大流速约介于 1.0~1.5 m/s 之间。从平面分布来看, 七都岛北汊水域流速强度较大于南汊水域流速, 北汊水流流速更强劲些。从垂向分布来看, 表层流速最大, 0.6 H 层流速其次, 底层流速最小。表层流速与底层流速的倍数关系多介于 1.5~1.8 倍。

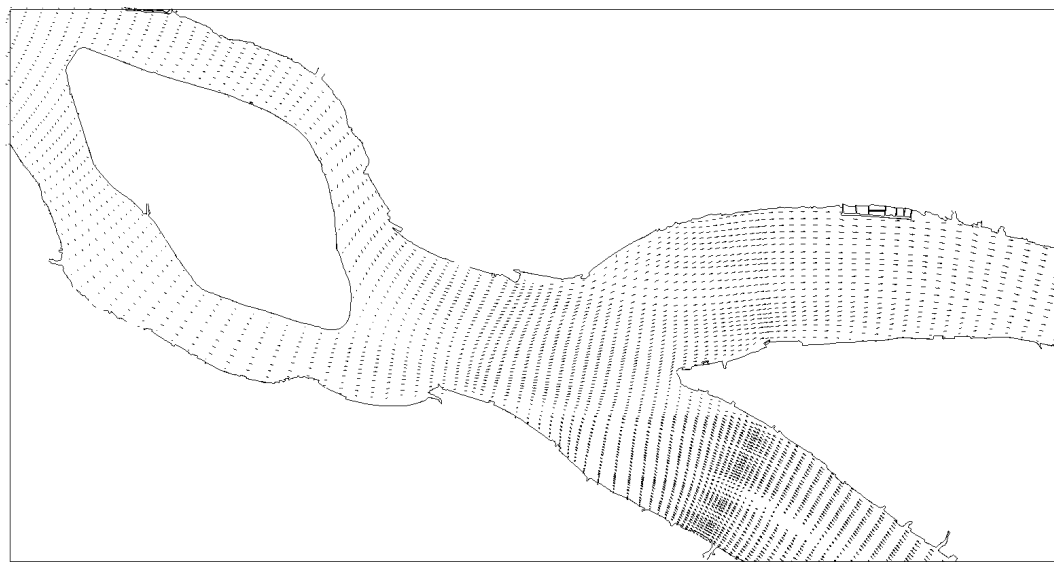


Figure 6. Distribution of velocity field in spring tide
图 6. 大潮涨急流速场分布



Figure 7. Distribution of Velocity field in spring ebb
图 7. 大潮落急流速场分布

5. 结论

瓯江口属于强潮河口, 并具有复杂地形条件, 为研究该河口的水动力特点, 生成了正交曲线坐标网格, 并建立了 3D、非恒定瓯江口水动力学模型, 研究了瓯江口在径流与潮汐共同作用下的水动力学特点。模拟了梅岱至洞头河段, 采用 2010 年的大、中和小潮条件对 8 个站点潮位进行了验证, 模拟值与实测值吻合较好, 表明模型有较好适应性, 能满足波流作用下的瓯江口水动力研究。应用于该河口段的水动力场的流场和潮差研究, 结果表明: 从上游至下游潮差逐渐减小, 上游江心寺大潮潮差 6.12 m, 小潮潮差 4.85 m; 坎门大潮潮差 4.93 m, 小潮潮差 3.74 m。瓯江河口涨落潮流速较大, 且总体呈现落潮大于涨潮特点。涨潮平均流速约 0.7~1.0 m/s, 落潮平均流速约介于 0.9~1.3 m/s。七都岛北汊水域流速强度较大于南汊水域流速。

基金项目

国家重点研发计划(2016YFC0402006)。

参考文献

- [1] 李孟国, 庄小将, 李文丹. 温州石化基地围垦工程潮流泥沙数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2008, 154(2): 31-34.
- [2] 郑敬云, 李孟国, 麦苗, 吴以喜. 瓯江口水文泥沙特征分析[J]. 水道港口, 2008, 29(1): 1-6.
- [3] 王顺中, 陈春, 等. 瓯江口航道治理措施研究及效果[C]. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集: 2011 年卷.
- [4] Ji, Z.G. (2008) Hydrodynamics and Water Quality Modeling Rivers, Lakes and Estuaries. Wiley.
- [5] 陈景秋, 赵万星, 季振刚. 重庆两江汇流水动力模型[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2005: 73-79.
- [6] 赵万星. 长江, 嘉陵江重庆主城区段的环境流体动力学模拟[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2005.