



波流共同作用下磨刀门河口余流特征分析

汪玉平, 何威, 陈妍宇, 辜伟芳, 许庆

(浙江省海洋科学院, 浙江杭州 310012)

摘要: 磨刀门河口水动力条件复杂, 波浪作用明显, 波浪影响下磨刀门河口余流特征的研究较少。本文基于 SCHISM 模型, 建立二维波流耦合数值模型, 通过比较有波浪和无波浪影响的河口余流特征, 分析波浪对余流的影响, 并从余流角度定性分析交杯四沙演变特征。结果表明: 磨刀门河口西汉余流动力较强, 西侧龙屎窟水道出口处余流较小, 四沙水域受波浪作用较明显, 余流动力介于两者之间。四沙水域余流流向在波浪作用下发生较大改变; 交杯四沙在西汉强劲余流以及波浪掀沙作用下, 四沙脊线有向西顺时针偏转趋势。

关键词: SCHISM 模型; 波流共同作用; 余流; 磨刀门河口

中图分类号: TV148; U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0020-07

Characteristics of residual current in Modaomen Estuary under wave-current interaction

WANG Yuping, HE Wei, CHEN Yanyu, GU Weifang, XU Qing

(Marine Academy of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The hydrodynamic conditions of Modaomen Estuary are complex and the wave action is obvious. However, There is relatively little research on the residual currents characteristics in Modaomen Estuary under the influence of waves. This article is based on the SCHISM model and establishes a two-dimensional wave-current coupling numerical model. By comparing the characteristics of estuarine residual current in estuaries with and without wave influence, the impact of waves on the residual current is analyzed. Qualitatively analysis is conducted on the evolution characteristics of No. 4 Jiaobei Sand from the perspective of residual current. The results show that the residual current force in the west branch of Modaomen estuary is relatively strong, and the residual current at the exit of Longshiku waterway on the west side is relatively small. Near the No. 4 Jiaobei Sand, wave action is more obvious, and the residual current force is somewhere in between. Direction of residual current has a great change under the action of wave. Under the action of the strong residual current from the west branch and the wave lifting force, the ridge line of No. 4 Jiaobei Sand has a tendency to deflect clockwise to the west.

Keywords: SCHISM mode; wave-current interaction; residual current; Modaomen Estuary

磨刀门河口位于粤港澳经济发达区, 是西江干流主要入海口门。自 20 世纪 50 年代以来, 在人为活动以及自然演变双重影响下河口位置不断外延, 海洋动力对其影响越来越突出, 河口类型逐渐向“河-波”型转变^[1-2], 水动力条件发生显著变化, 波浪作用越来越明显, 而河口动力的变化将引起地貌的变化^[3]。因此, 在对该河口水流

以及水下地形演变的研究中, 波浪作用不可忽视, 目前关于磨刀门河口动力以及地貌演变的研究较多^[4-8], 而考虑波浪作用下磨刀门河口余流特征研究较少。

自 20 世纪 60 年代, 余流及其对河口物质输运的研究越来越受到关注^[9-10], 刘诚等^[11]研究指出余流受波浪影响, 磨刀门河口波浪作用方向向

收稿日期: 2023-11-29

作者简介: 汪玉平 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事河口、海岸水动力研究工作。

陆,波生流削弱浅滩区的向海余流,增大浅滩向陆余流。陈沈良^[12]指出余流一定程度上反映水体的输移和交换情况,余流流向通常是泥沙运动和污染物质扩散运移的方向,与河口物质的长期输移、沉积密切相关^[13]。因此,研究波流共同作用下该海域的余流特征,可以全面了解磨刀门河口水动力特征以及该海域交杯四沙的演变特征,为海域工程决策提供一定的参考。

本文基于 SCHISM 模型,建立珠江河口二维波流耦合模型,结合实测水位、流速资料验证模型的可靠性。通过模型计算结果,对磨刀门河口余流特征进行研究,定量分析海域拉格朗日余流场的时空分布特征,定性分析磨刀门河口交杯四沙演变特征。

1 数值模型建立

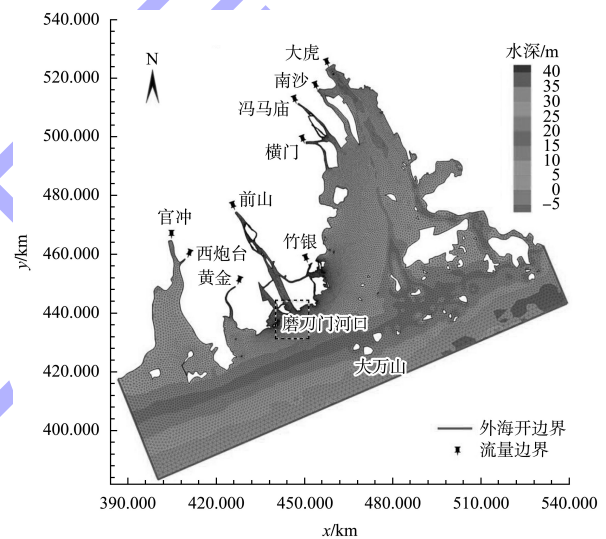
1.1 数值模型

SCHISM (semi-implicit cross-scale hydroscience integrated system model) 模型是在 SELFE (semi-implicit eulerian-lagrangian finite-element model)^[14-15] 的基础上开发的跨尺度海洋综合数值模型。该模型由水动力模块、波浪模块、泥沙输运模块以及底床演变模块等组成。模型系统采用非结构化网格,可较好地适应具有复杂边界的区域。方程离散采用半隐半显的有限元算法,动量方程中平流项处理采用欧拉-拉格朗日方法,模型计算高效且稳定。模型没有 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 稳定性条件的约束,使得模型计算具有较大的时间步长。针对本研究内容,模型采用水动力模块以及波浪模块搭建,波浪模块需要水动力模块提供表面高程、干/湿单元和流速数据,以计算波高和辐射应力。水动力模块需要波浪模块提供辐射应力、总表面应力和波浪轨道速度等信息,以计算潮位变化下的水深、流速等。

1.2 模型边界及参数设置

为便于比较研究区域在不同动力条件下的余流特征,建立不考虑波浪作用的潮流模型以及考虑波浪作用的波流耦合模型。波流耦合模型在潮

流模型的基础上增加波浪模块并进行双向耦合设置,2个模型在范围、工况选择以及网格划分等设置方面一致。考虑到边界条件对数值计算的影响,减小边界条件对研究区域的干扰,模型范围包含整个珠江河口八大口门,上游流量边界9个,分别取到大虎、南沙、冯马庙、横门、竹银、前山、黄金、西炮台以及官冲;潮流模型外海边界为潮位边界,由全球潮波模型 nao99 求得,模型上游边界给定实测流量过程;波浪模块外海边界作为入射边界,给定波高与周期,其他边界设为零梯度条件。模型计算域范围以及水深地形见图1。



注:地形资料采用2011年珠江河口区域实测水下地形,计算时转换为珠江基面。

图1 模型计算域范围以及水深地形

模型采用三角形网格划分,可更好地贴合复杂岸线。在不影响整个模型计算效率的情况下,为了提高研究区域(磨刀门河口水域)的计算精度,采用局部加密的方法对研究域进行加密,而其他区域尽量稀疏。划分结果见图1,共有网格数4.8198万个,节点数2.6312万个,划分最小节点间距为14.5m。考虑到底部糙率对模型计算的影响,以及该参数与水深、地形以及底质特征的相关性,模型中曼宁系数设置随空间变化而变化。波浪在传播过程中将发生破碎,磨刀门外海海域地形变化相对平缓,在磨刀门河口区水深变化较复杂,本次计算取破碎指标为0.78。

模型计算时间分洪、枯季两个时段，各时段均包含一个完整的天文潮过程。枯季计算时间为2011-12-02T17:00:00—2011-12-14T17:00:00，共12 d，洪季计算时间为2012-05-05T17:00:00—2012-05-15T17:00:00，共10 d。模型时间步长设置为150 s。由于磨刀门河口位于近岸地区，主要受外海涌浪影响，研究仅考虑规则波，波浪模块入射边界给定波高和周期，根据大万山海洋站逐月波浪要素(表1)，在计算时段内磨刀门外海波浪条件为：枯季设置有效波高 $H_s=1.2$ m，平均波周期 $T=5.8$ s，平均波向SSE向(取 137°)；洪季波浪模块外边界设置有效波高 $H_s=1.1$ m，平均波周期 $T=5.1$ s，平均波向SSE向(取 140°)。

表1 大万山海洋站逐月及洪枯季波浪要素

月份	有效波高/m	周期/s
1	0.99	5.4
2	1.03	5.6
3	0.95	5.4
4	0.85	5.1
5	0.91	5.1
6	0.99	5.5
7	1.03	5.3
8	0.93	5.5
9	0.85	5.1
10	0.94	5.3
11	1.00	5.4
12	1.05	5.8
洪季(4—9)	0.93	5.3
枯季(10—3)	0.99	5.5

2 模型验证

为保证计算结果的可靠性，根据2011年12月以及2012年5月实测资料，对建立的数值模型进行验证，其中水位验证点为望洋角测点 T_1 和横琴岛测点 T_2 ，流速验证点为枯季验证点 B_1 ，洪季验证点 H_1 ，验证点位置见图2。通过均方根误差(S_{RME})定量判断：

$$S_{RME} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (1)$$

式中： N 为数据总数， M_i 为计算值， O_i 为实测值。

验证结果见图3、4。结果表明：模型模拟值与

实测值相差不大，误差在允许范围之内。水位实测值与计算值之间的均方误差 $S_{RME} < 0.105$ 。

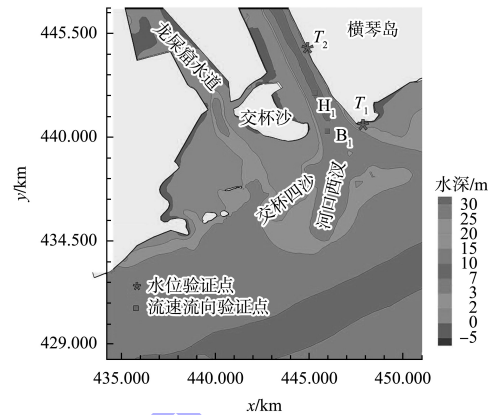
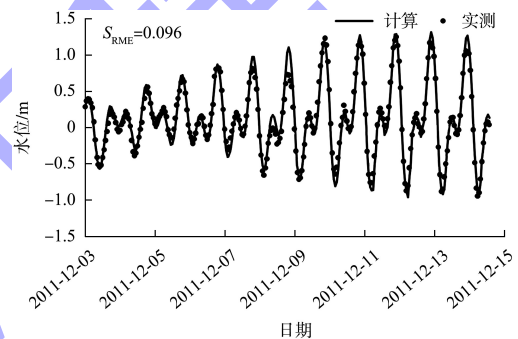
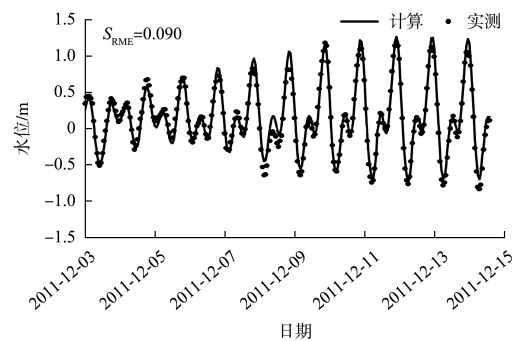


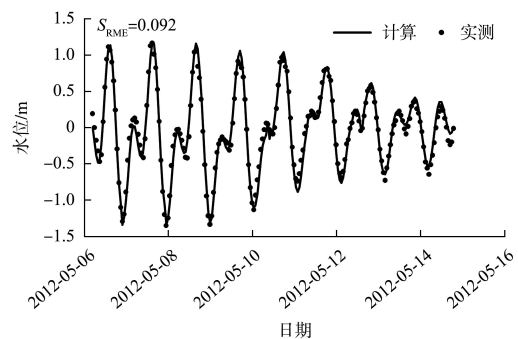
图2 验证点位置



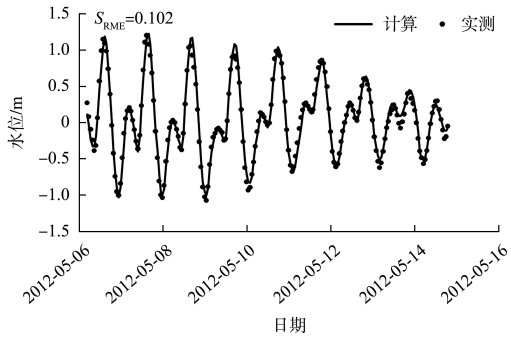
a) 枯季, T_1



b) 枯季, T_2

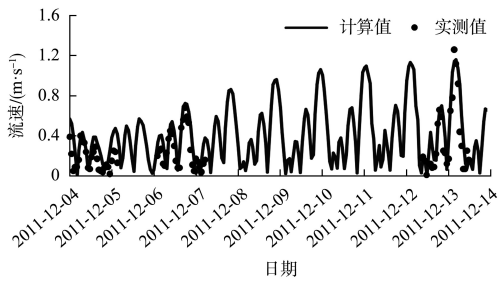


c) 洪季, T_1

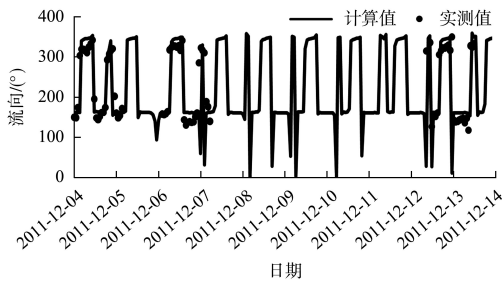


d) 洪季, T_2

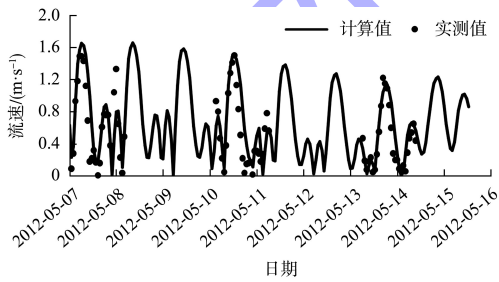
图3 枯季和洪季水位验证



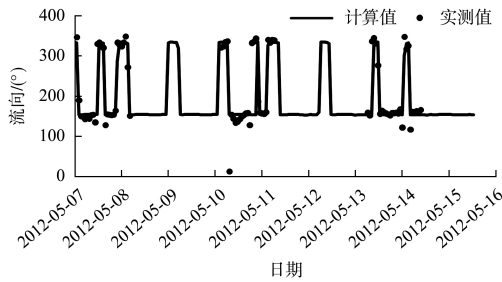
a) B_1 流速



b) B_1 流向



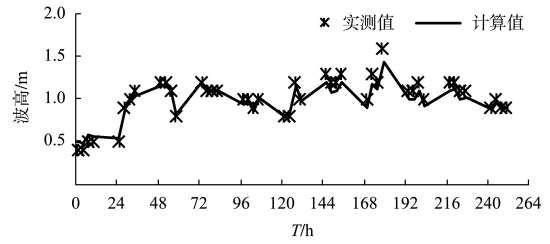
c) H_1 流速



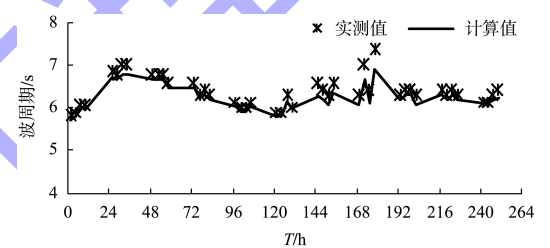
d) H_1 流向

图4 测点流速、流向验证

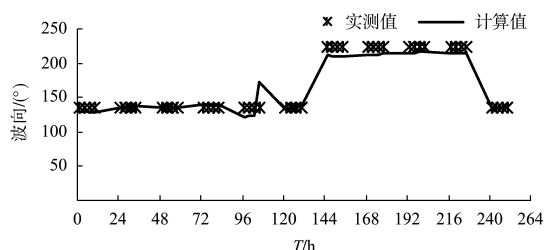
大万山海洋站位于磨刀门河口东南侧(图1), 波浪模块采用大万山海洋站实测波浪数据验证, 通过调整外海入射边界波要素、底部摩擦系数和破碎指标等, 得到验证结果见图5。综上, 模型计算结果和实测结果较一致, 模型较好地模拟了磨刀门河口波流共同作用下的水流变化过程, 计算结果可靠。



a) 波高



b) 波周期



c) 波向

图5 大万山海洋站波要素验证

3 结果分析

3.1 余流计算方法

在对余流的研究过程中, 最早提出的是欧拉余流, 它通过对空间固定点上的瞬时流速序列进行一个或多个潮周期平均来表示, 研究表明欧拉余流存在重大的理论缺陷, 若用欧拉余流来描述余流场, 海面将出现虚假的“潮源”项, 违背物质守恒条件。随着对余流的进一步研究, 弱非线性条件下的拉格朗日余流得到了发展, 因其具有更明确的物理概念, 并能从理论上较好地解决欧拉余流所存在的问题, 自20世纪80年代以来,

Feng 等^[16]建立和发展了弱非线性拉格朗日余流及物质长期输运理论, 给出弱非线性条件下拉格朗日余流速度的表达式, 并指出物质输运速度可表示为一般非线性拉格朗日余流速度的一阶近似。

欧拉余流 U_E 计算公式:

$$U_E = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}(x, y, t) dt \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}(x, y, t)$ 为空间位置点 (x, y) 在时刻 t 下的流速。

拉格朗日余流^[17] U_L 计算式:

$$U_L = U_E + U_S + kU_{ld} + \dots \quad (3)$$

式中: U_S 为斯托克斯漂流, k 为衡量系统非线性强度的无量纲参数, U_{ld} 为拉格朗日漂移速度。

在弱非线性条件下, 拉格朗日余流速度的二阶项——拉格朗日漂移速度 U_{ld} 及更高阶项可以忽略, 从而简化为:

$$U_L = U_E + U_S = \bar{\mathbf{u}} + \frac{\int_0^T \mathbf{u}_t \zeta dt}{Th_0} \quad (4)$$

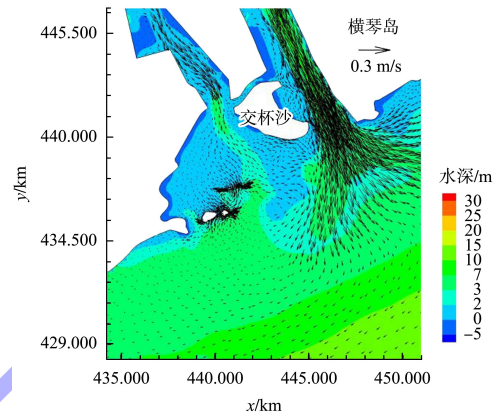
式中: h_0 为位置点 (x, y) 初始水深, ζ 为点 (x, y) 潮位, $\bar{\mathbf{u}}$ 为欧拉余流, \mathbf{u}_t 为位置点 (x, y) 在时刻 t 下的流速。式(4)也可表示为物质输运速度, 可见拉格朗日余流与水深、潮位、流速密切相关。

3.2 磨刀门河口拉格朗日余流特征

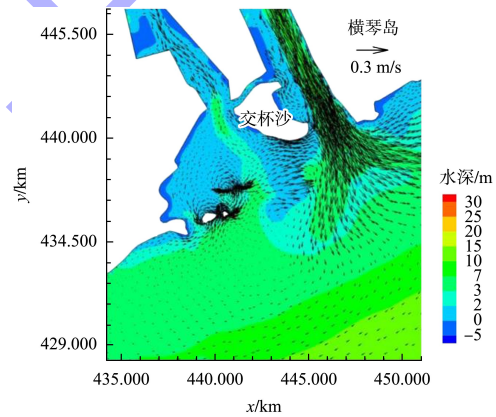
弱非线性条件下拉格朗日余流由欧拉余流和斯托克斯漂流组成。由计算式可知斯托克斯漂流大小取决于水位、流速和水深。对于前进潮波, 流速和水位相位基本相同; 而对于理想驻波, 两者相差 90° , 因此前进潮波作用下的斯托克斯漂流大于驻波作用下的斯托克斯漂流。对于水深的影 响, 表现为深水区的斯托克斯漂流小于浅水区。所以河口处拉格朗日余流受斯托克斯漂流影响, 时空变化明显。

从洪季中潮无浪欧拉余流场以及有浪/无浪作用下拉格朗日余流分布(图6)看出。龙屎窟水道及出口拉格朗日余流强度较小, 小于欧拉余流, 主要因为斯托克斯漂流流向与欧拉余流流向相反; 磨刀门水道主槽受径流影响, 余流强劲, 水道浅滩出现沿河道指向上游的拉格朗日余流, 因为此处欧拉余流较弱, 而水深较浅, 斯托克斯漂流较强, 且流向与

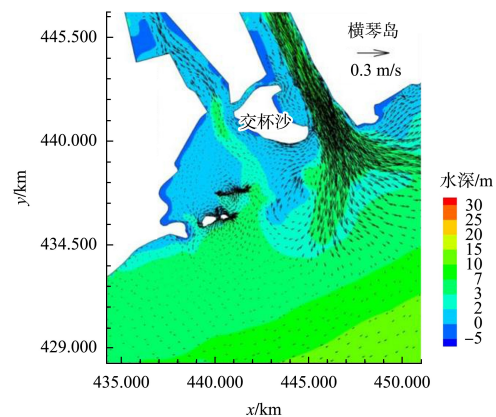
欧拉余流相反。交杯四沙处拉格朗日余流介于两者之间, 没有出现余流旋转, 无波作用下拉格朗日余流流向自西向东越过四沙, 有波作用下在四沙前坡余流流向出现顺波向较大幅度偏转, 而后坡没有同欧拉余流一样出现自东向西的余流, 说明四沙处有较强劲的自西向东的斯托克斯漂流。



a) 无浪欧拉余流场



b) 无浪拉格朗日余流场

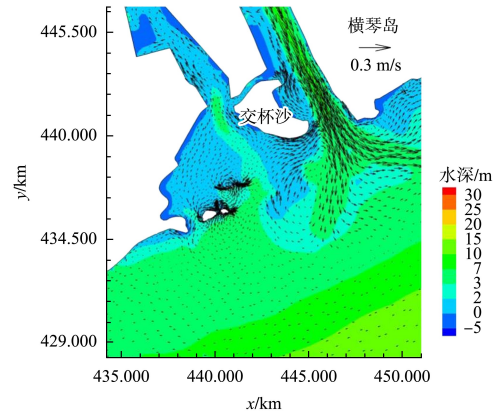


c) 有浪拉格朗日余流场

图6 磨刀门河口洪季中潮余流场分布

从枯季中潮无浪欧拉余流场、有浪和无浪作用下拉格朗日余流分布(图 7)看出, 龙屎窟水道和出口喇叭形水域以及磨刀门主槽浅滩拉格朗日余流流向均指向内陆, 很大程度由于枯季此处潮流作用明显, 涨潮动力要强于落潮动力。受地形影响, 在不考虑波浪作用下, 交杯四沙处拉格朗日余流自西向东穿过四沙, 这与洪季中潮拉格朗日余流类似, 但是强度大很多, 因为此处斯托克斯漂流与欧拉余流同向。在考虑波浪作用后, 交杯四沙前坡拉格朗日余流同样出现顺波向余流偏转, 随后余流与磨刀门主槽余流汇合共同流入南海。

对比洪季与枯季拉格朗日余流场可知, 枯季龙屎窟水道拉格朗日余流方向与洪季明显不同, 受斯托克斯漂流影响, 此处枯季余流方向多指向上游。总体而言, 斯托克斯漂流在洪季相对较弱, 而在枯季相对较强。但是在交杯四沙处, 无论洪季还是枯季, 由于欧拉余流较弱, 而斯托克斯流相对较强, 致使一股强劲的拉格朗日余流自西向东越过沙体, 且在波浪作用下, 四沙前坡余流顺波向偏转。



c) 有浪拉格朗日余流场

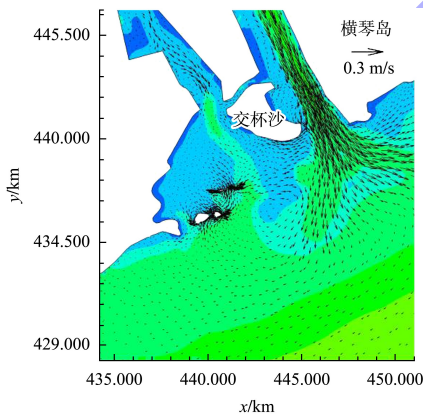
图 7 磨刀门河口枯季中潮余流场分布

由于径潮相互作用, 洪季上游径流量较大, 口门附近潮波变形, 驻波特性增强, 导致斯托克斯漂流减弱; 枯季上游径流量较小, 口门附近驻波特性较弱, 前进波特性较强, 因此斯托克斯流相对较强, 从而造成两种余流场的明显差异。

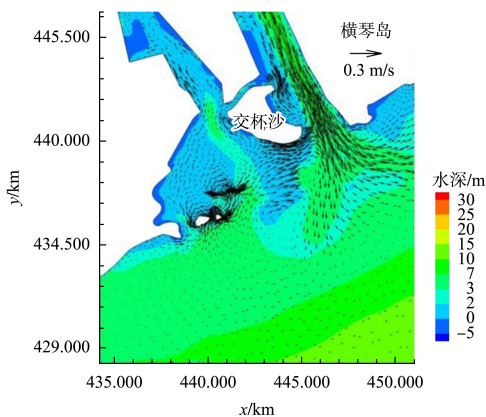
3.3 余流对交杯四沙的影响

余流是反映物质运输的重要指标, 从余流流向结合交杯四沙演变过程定性分析余流对交杯四沙演变的影响。交杯四沙不同阶段的演变过程, 见图 8, 从图中可以看出交杯四沙的中心位置在演变过程中大致不变, 沙体东西跨度不断拓宽, 而南北跨度不断束窄, 其脊线一直沿顺时针方向转动。具体表现为 2000 年交杯四沙-1 m 浅滩位置靠近东侧, 在“05·6”大洪水作用下, 西汉余流强劲, 沙体受到冲决, 略向西发展, 呈长轴正北走向的椭圆形; 至 2008 年, 椭圆长轴向西偏转, 呈 EN—SW 方向, 2011 年交杯四沙演变成近新月形沙体。

交杯四沙受斯托克斯漂流作用明显, 交杯四沙至交杯沙之间有一股强劲的拉格朗日余流自西向东流动, 叠加波浪对四沙前坡的作用, 四沙南北跨度有所束窄。强劲的西汉径流冲刷四沙东侧, 且西汉径流从上游带来的泥沙下泻至四沙前坡附近时, 在波浪的作用下发生偏转, 泥沙被波浪掀起, 顺浪向输运至四沙中后段, 四沙呈向西顺时针偏转的趋势。



a) 无浪欧拉余流场



b) 无浪拉格朗日余流场

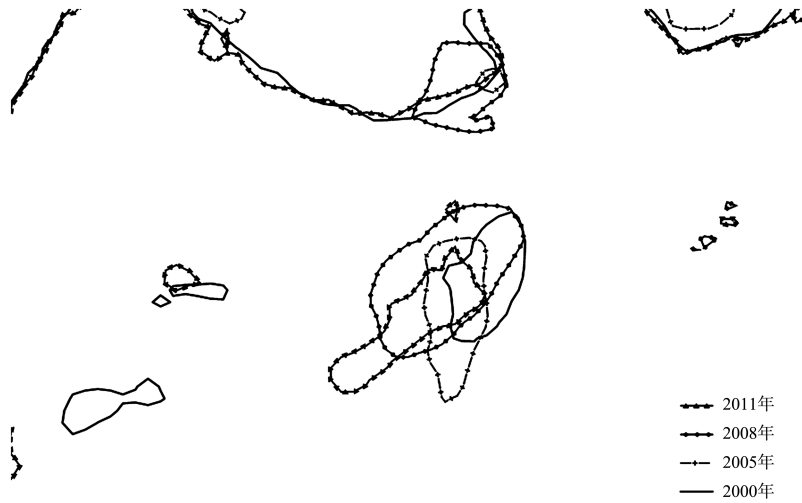


图8 交杯四沙浅滩附近 1 m 等深线对比

4 结论

1) 无论洪季还是枯季, 交杯四沙东侧即磨刀门河口西汉余流较大, 西侧即龙屎窟水道出口喇叭形水域余流较小, 四沙水域余流介于两者之间, 且受波浪影响明显。说明交杯四沙东侧以径流作用为主, 西侧为潮控区以潮流作用为主, 而前坡受波浪作用的影响显著。

2) 对比有波和无波条件下拉格朗日余流场发现, 无论洪季还是枯季, 波浪对交杯四沙水域余流场影响较大, 主要体现在对余流流向的改变。

3) 结合交杯四沙演变特征, 从余流流向上定性分析, 在余流作用下四沙南北向跨度有一定的束窄; 四沙前坡波浪掀沙后, 泥沙在余流作用下往西北向, 并带向后坡, 四沙东侧受西汉强劲余流作用, 逐渐冲刷, 四沙脊线呈现向西顺时针偏转的趋势。

参考文献:

[1] 胡达, 李春初, 王世俊. 磨刀门河口拦门沙演变规律的研究[J]. 泥沙研究, 2005(4): 71-75.

[2] 王世俊, 胡达, 李春初. 磨刀门河口近期演变及其排洪效应[J]. 海洋通报, 2006, 25(2): 21-26.

[3] 钱挹清. 珠江河口磨刀门口外浅海区冲淤演变分析[C]//中国江河河口研究及治理、开发问题研讨会文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 277-283.

[4] 贾良文, 吕晓莹, 程聪, 等. 珠江口磨刀门月际尺度地貌演变研究[J]. 海洋学报(中文版), 2018, 40(9): 65-77.

[5] 梁娟, 李春初. 人类活动影响下磨刀门河口的泥沙输运沉积[J]. 泥沙研究, 2010(3): 67-72.

[6] 贾良文, 吴超羽, 任杰, 等. 珠江口磨刀门枯季水文特征

及河口动力过程[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 82-88.

[7] 李春初, 雷亚平, 何为, 等. 珠江河口演变规律及治理利用问题[J]. 泥沙研究, 2002(3): 44-51.

[8] 贾良文, 吴超羽. 磨刀门河口近期水文动力变化及人类活动对其影响研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 46-53.

[9] JIA L W, WEN Y, PAN S, et al. Wave-current interaction in a river and wave dominant estuary: A seasonal contrast[J]. Applied ocean research, 2015, 52: 151-166.

[10] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤海、黄海和东海的潮流特征及其与近岸环流输送的关系[J]. 海洋科学集刊, 1995, 36(1): 1-11.

[11] 刘诚, 梁燕, 王其松, 等. 磨刀门河口洪季波生流及其泄洪影响[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 770-779.

[12] 陈沈良. 杭州湾口南汇咀近岸水域水沙特征与通量[J]. 海洋科学, 2004, 28(3): 18-22.

[13] 万猛, 姚炎明, 陈琴, 等. 象山港余流特征数值研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(3): 295-302.

[14] ZHANG Y L, BAPTISTA A M. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation[J]. Ocean modelling, 2007, 21(3/4): 71-96.

[15] ZHANG Y J, YE F, STANEV E V, et al. Seamless cross-scale modeling with SCHISM [J]. Ocean modelling, 2016, 102: 64-81.

[16] FENG S Z, XI P G, ZHANG S Z. The baroclinic residual circulation in shallow seas [J]. Chinese journal of oceanology and limnology, 1984, 2(1): 49-60.

[17] JIANG W S, FENG S Z. Analytical solution for the tidally induced Lagrangian residual current in a narrow bay[J]. Ocean dynamics, 2011, 61(4): 543-558.

(本文编辑 赵娟)