

石岛海域潮流通道及岬湾的泥沙动力机制研究

朱子晨, 胡泽建, 刘建强, 张永强, 熊丛博, 边淑华

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 石岛海域潮流通道的动力条件强劲, 潮流通道向岸一侧的黑泥湾敞开性高, 波浪作用明显, 水道、岬湾底质类型包含砾石、砂、粉砂、淤泥各种类型, 因而泥沙运动具有特殊性。基于 FVCOM 的泥沙模块, 采用拟合希尔兹曲线改良模型的泥沙起动条件, 同时采用多组分泥沙百分含量分布来反映不同地区的底质类型, 研究黑泥湾海域夏季泥沙运动规律。模型参数采用 2010 年沉积物粒度分析资料率定, 潮汐、潮流、波浪、悬沙模型采用 2006 年观测资料及遥感图验证, 冲淤模型采用 1980—2006 年测深资料进行趋势比对。结果显示, 黑泥湾整体呈弱侵蚀状态, 潮流通道西侧出现 N—S 向带状侵蚀区, 半月潮周期内最大冲刷深度 3.5 mm。潮流通道水动力条件强, 但沉积物成分较粗, 侵蚀较弱。镔岛东侧近岸海域冲淤变化复杂, 冲刷或淤积趋势交替占据优势, 半月潮周期内, 潮差高于 1.4 m 时潮流较强, 冲刷为主导趋势, 潮差下降后, 非本地起动的泥沙逐渐在此淤积, 淤积为主导趋势。

关键词: 泥沙冲淤; 波流共同作用; 潮流通道; FVCOM; 石岛海域

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)03-0435-14

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.03.010

石岛海域位于山东半岛东端荣成市境内, 潮流通道北起褚岛, 南至镔岛, 水动力条件强。潮流通道向岸一侧为黑泥湾, 属开敞性海湾。该海域底质类型在空间上变化明显, 近岸以砂质为主, 黑泥湾内以粉砂、淤泥为主, 潮流通道在褚岛处以砾石为主, 自北向南, 至镔岛逐渐变为中粗砂。因此, 该海域泥沙运动具有特殊性。近年来, 由于核电工程的建设及滨海旅游开发, 黑泥湾海洋环境引起广泛关注^[1]。同时, 黑泥湾是我国重要的海带养殖区域^[2], 且由于领海基点所在的镔岛环境保护问题, 石岛海域已成为我国海岸带研究的新兴热点^[3-6]。黑泥湾内沉积物以悬移质为主要组成成分, 从未来核电工程取水设施运营的稳定性等因素考虑, 泥沙问题十分关键。此外, 当地沉积物环境质量同时受到泥沙运动的影响, 旅游业开发和海带养殖的可持续发展均受到泥沙运动制约。因此, 对黑泥湾的泥沙运动及其动力机制研究具有显著的现实意义。

为研究黑泥湾泥沙运动规律, 本文从黑泥湾特殊的水动力条件及沉积物环境出发, 充分考虑当地海域波流共同作用的动力特征, 同时考虑黑泥湾沉积物类型空间变化显著的特点, 采用以泥沙模型为主, 测深资料比对、悬沙取样分析为辅的研究方法, 分析黑泥湾泥沙运动特征, 揭示其动力机制, 为当地核电工程运营、旅游开发、海水养殖和领海基点保护提供依据。

1 研究方法

1.1 水动力观测与泥沙取样分析

1) 潮汐、潮流、波浪、悬沙同步观测

研究海域位置见图 1, 布置海流、悬沙同步观测站位 4 处(图 2b, D1-D4), 分 5 层观测。同期布置波浪测

收稿日期: 2017-09-05

资助项目: 国家自然科学基金项目——粉砂海岸典型剖面极端海况泥沙运动观测及其动力机制研究(41276084)

作者简介: 朱子晨(1988-), 男, 山东青岛人, 助理工程师, 硕士, 主要从事海岸动力地貌方面研究。E-mail: zhuzichen@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

SG 为标记的区域代表砾石作为主要成分的区域并含有少量粗砂;MCS 代表中值粒径 $d_{50}=0.25$ mm;FS 区域 $d_{50}=0.125$ mm;TS 区域 $d_{50}=0.063$ mm;STY 代表沉积物为砂 ($d_{50}=0.016$ mm)、粉砂 ($d_{50}=0.032$ mm) 和淤泥 ($d_{50}=0.002$ mm) 的混合物;YT 代表沉积物组成为粉砂 ($d_{50}=0.032$ mm) 与淤泥 ($d_{50}=0.002$ mm) 的混合物。

1.2 沉积动力学模型

1) 控制方程与边界条件

基于 FVCOM 的三维泥沙模型,在泥沙起动方面进行改良。海浪模拟使用 SWAN 模型计算结果单向耦合。FVCOM 的水动力模型可参见其说明^[9],SWAN 模型的控制方程及基本假设等可参考其说明^[10]。泥沙模型的控制方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad (1)$$

式中: t 表示时间; x, y, z 表示笛卡尔坐标系中的东向、北向与垂向坐标; u, v, w 表示海水在 x, y, z 方向上的速度分量; c 表示悬浮泥沙浓度; A_h 表示水平涡旋黏滞系数; K_m 表示垂向涡旋黏性系数; w_s 表示泥沙沉降速率。

对于海水表面边界条件,悬浮泥沙通量为 0:

$$K_m \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad z = \zeta, \quad (2)$$

式中: ζ 表示海水自由表面的高度。

在海底,泥沙通量则为起动与沉降的差值:

$$K_m \frac{\partial c}{\partial z} = Q_e - Q_d \quad z = -H, \quad (3)$$

式中: H 表示水深; Q_d 表示悬浮泥沙的沉降量; Q_e 表示泥沙起动量。对于泥沙起动量,采用 Ariathurai 与 Arulanandan 在 1978 年提出的计算式^[11]:

$$Q_e = m_e f(\tau/\tau_{ce} - 1), \quad (4)$$

式中: m_e 表示单位时间单位面积上的泥沙起动率; τ 表示波流共同作用于海床的切应力; τ_{ce} 代表泥沙临界起动切应力; f 表示各泥沙组分在每个网格点上所占的面积分数。作用在海床上的切应力使用 Soulsby 与 Whitehouse 于 1997 年提出的参数化近似公式^[12]:

$$\tau = \sqrt{(\tau_{cw} + \tau_w \cos \alpha)^2 + (\tau_w \sin \alpha)^2}, \quad (5)$$

式中: τ_{cw} 表示在海流方向上的波致切应力; τ_w 表示波浪作用下的剪切应力; α 表示海流与波浪方向的夹角。

目前,被广泛使用的泥沙模型(如 FVCOM-Sed、ECOM-Sed)中,临界起动切应力或临界起动流速为常数,但临界起动条件为切应力、泥沙粒径、黏结力、雷诺数等因素的函数^[13-17]。根据戴清等在 2014 年拟合的希尔兹曲线^[18],以表达临界起动条件的时变性,其拟合曲线如下:

$$\theta_{ce} = \frac{0.06}{Re_*} \left(\frac{10.9 + Re_*^{1.6}}{4.9 + Re_*^{0.6}} \right) \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{-0.05}, \quad (6)$$

式中: Re_* 表示颗粒雷诺数; ρ_s 表示沉积物密度; θ_{ce} 表示相对临界起动切应力,其与临界起动切应力的关系:

$$\theta_{ce} = \frac{\tau_{ce}}{d(\gamma_s - \gamma)}, \quad (7)$$

式中: γ 与 γ_s 分别表示海水与沉积物的容重; d 表示沉积物粒径。颗粒雷诺数为摩阻流速的函数:

$$Re_* = U_* d / \nu, \quad (8)$$

式中: ν 表示运动黏性系数; U_* 表示摩阻流速, $U_* = \sqrt{\tau/\rho}$ 。

泥沙沉降通量采用 Prandle 于 1997 年提出的计算方法^[19]:

$$Q_d = w_d c_b, \quad (9)$$

式中, c_b 表示底层海水的悬沙质量浓度; w_d 表示海底折算泥沙沉降速度。

2) 边界与参数设置

非结构网格分辨率在近岸设置为 150 m, 开边界设置为 5 km (图 3)。垂向分层设置 5 层, 与观测分层一致。开边界驱动条件包含 $M_2, S_2, K_2, N_2, K_1, Q_1, P_1$ 及 O_1 共 8 个分潮。波浪场采用 SWAN 模型输出结果单向耦合, 利用美国国家海洋和大气管理局风场数据, 首先对整个黄渤海地区进行模拟, 模拟结果作为边界条件, 对 FVCOM 的加密区域进行模拟。模型主要参数设置列于表 1, 其中部分参数通过模型试算率定, 该方法被广泛应用在泥沙运动的数值研究中, 如 Aldridge 在 1996 年对爱尔兰海对泥沙问题的数值研究^[20]、Jago 与 Jones 在 1998 年对北海南部悬沙的数值研究^[21]、Bass 等在 2002 年于英格兰沃什湾进行的海流与悬沙相位差数值研究^[22]等。本研究模拟计算时段包含观测时段, 并涵盖 1 个完整的半月潮周期。

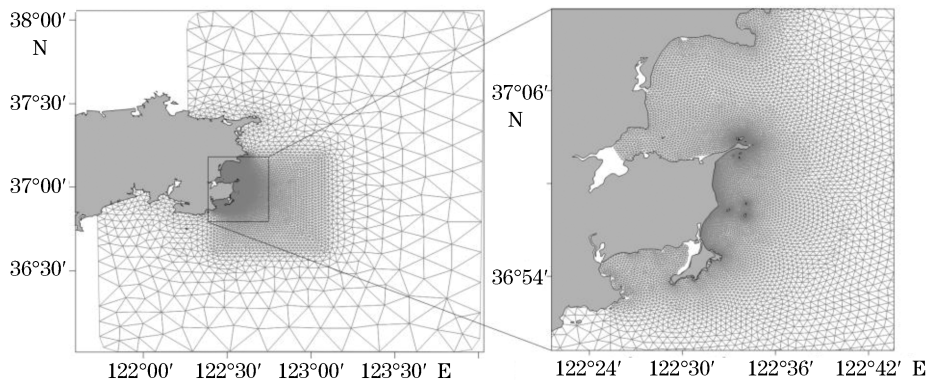


图 3 非结构网格剖分

Fig.3 Unstructured grid of the model

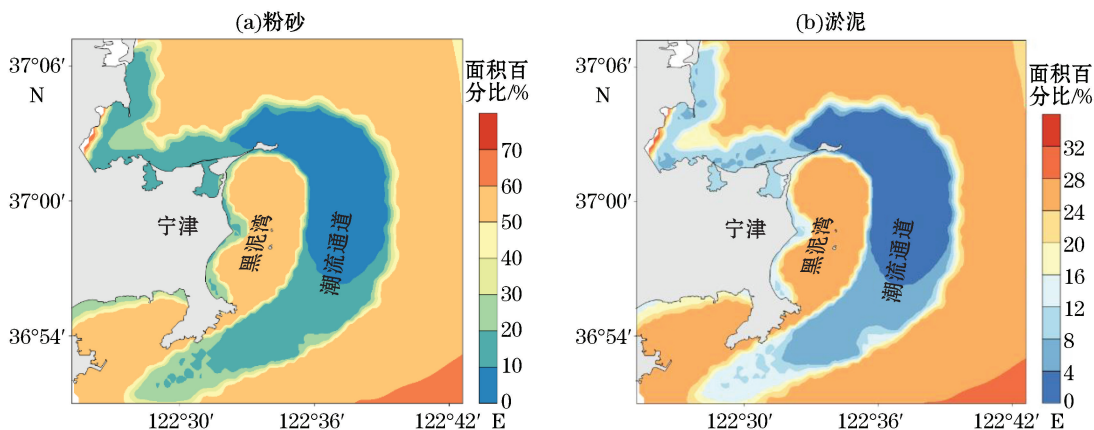


图 4 各泥沙组分的面积百分比平面分布

Fig.4 Fraction distributions of silt and mud components

沉积物调查结果显示 (图 2a), 沉积物类型的空间变化明显, 因此采用 2010 年沉积物粒度分析资料^[8], 结合中国近海与海岸带调查图集集中的沉积物调查结果^[9], 并参考尹超等于 2013 年在黑泥湾海域进行的沉积物粒度调查结果^[5-6], 使用 Kriging 插值方法, 设置多组分沉积物的各组分面积百分比 (图 4)。根据调查结果, 模拟 3 种泥沙组成成分, 即采用粒径为 0.004 mm 的沉积物代表泥沙粒径小于 0.008 mm 的淤泥质组分, 以粒径 0.035 mm 代表粒径范围在 0.008~0.063 mm 的粉砂组分。从 2010 年粒度分析结果看, 接近潮流通

道处泥沙粒径在 1 mm 以上,且中国近海与海岸带调查图集显示,潮流通道等区域沉积物以砾石为主,参照《海洋调查规范 第 8 部分 海洋地质地球物理调查》^[23],极粗砂粒径在 1~2 mm,砾石粒径大于 2 mm,因而以粒径 2.0 mm 代表推移质组分。图 4 所示的平面分布表示模型粉砂、淤泥组分在沉积物中的面积分数,在图中 2 种组分加和小于 1 的情况下,所余即为推移质组分。

表 1 模型参数设置
Table 1 Model parameters

参 数	符号/单位	参数值	备 注
外模时间步长	$\Delta t_e/s$	1	
内模时间步长	$\Delta t/s$	1	
海水密度	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	1 025	
泥沙密度	$\rho_s/kg \cdot m^{-3}$	2 650	
海水容重	$\gamma/kN \cdot m^{-3}$	10.045	
泥沙容重	$\gamma_s/kN \cdot m^{-3}$	25.97	
垂向涡动黏性系数	$K_m/m^2 \cdot s^{-1}$	0.000 1	
水平涡旋黏滞系数	$A_h/m^2 \cdot s^{-1}$	0.2	
最低拖曳系数	C_{dmin}	0.005	FVCOM 水动力模块参数及其物理意义 可参见说明册 ^[10]
有效粗糙度	Z_0/m	0.001	
运动黏性系数	$\nu/m^2 \cdot s^{-1}$	0.000 001	
推移质组分粒径	d_1/mm	2.0	
粉砂质组分粒径	d_2/mm	0.035	
淤泥质组分粒径	d_3/mm	0.004	
推移质单位时间单位面积泥沙起动率	$m_{e1}/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	0.000 05	通过参数率定结合 Droppo 等 2015 年研究结果 ^[24] 确定
粉砂质单位时间单位面积泥沙起动率	$m_{e2}/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	0.000 036	
淤泥质单位时间单位面积泥沙起动率	$m_{e3}/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	0.000 007	

注:空白表示无数据

2 结果与验证

1)模型水动力结果验证

验证采用 2006-07-24T17:00—26T23:00 潮汐、波浪观测资料。潮位模拟结果与观测一致,研究海域潮汐类型属不正规半日潮(图 5a)。波浪观测结果显示,研究海域在 2006-07-25T8:00—19:00 时段内明显受到波浪影响。观测期间该海域盛行 SW 风,观测时段 SE、S 向浪频率较高。模型较好地还原了观测时段内波浪的相位,但波高低于观测结果。采用 Rijn 等 2003 年提出的相对平均绝对误差(RMAE)方法,计算波高的 RMAE 为 0.17,误差在合理范围^[25]。海流验证采用 07-25T8:00—26T9:00 观测资料,计算潮流与观测结果基本一致(图 5b~图 5e)。

2)悬沙验证

悬沙观测结果显示(图 6),D1 和 D4 两站悬沙呈明显的半日潮周期,说明两站泥沙运动以潮流为主要动力因素,D2 和 D3 两站水深小于 10 m,明显受到波浪作用,其中,07-26T00:00—08:00,波浪影响较强,悬沙陡增。模型结果基本符合观测。虽然 D1 站底质类型以推移质为主,但由于该位置水动力条件最强,悬沙质量浓度相对较高,浪流共同作用下,观测到最高悬沙质量浓度为 117 mg/L。D4 站悬沙质量浓度最高,观测到最高悬沙质量浓度为 151 mg/L,这是因为该处底质类型以粉砂、淤泥质为主,且水动力条件较强。

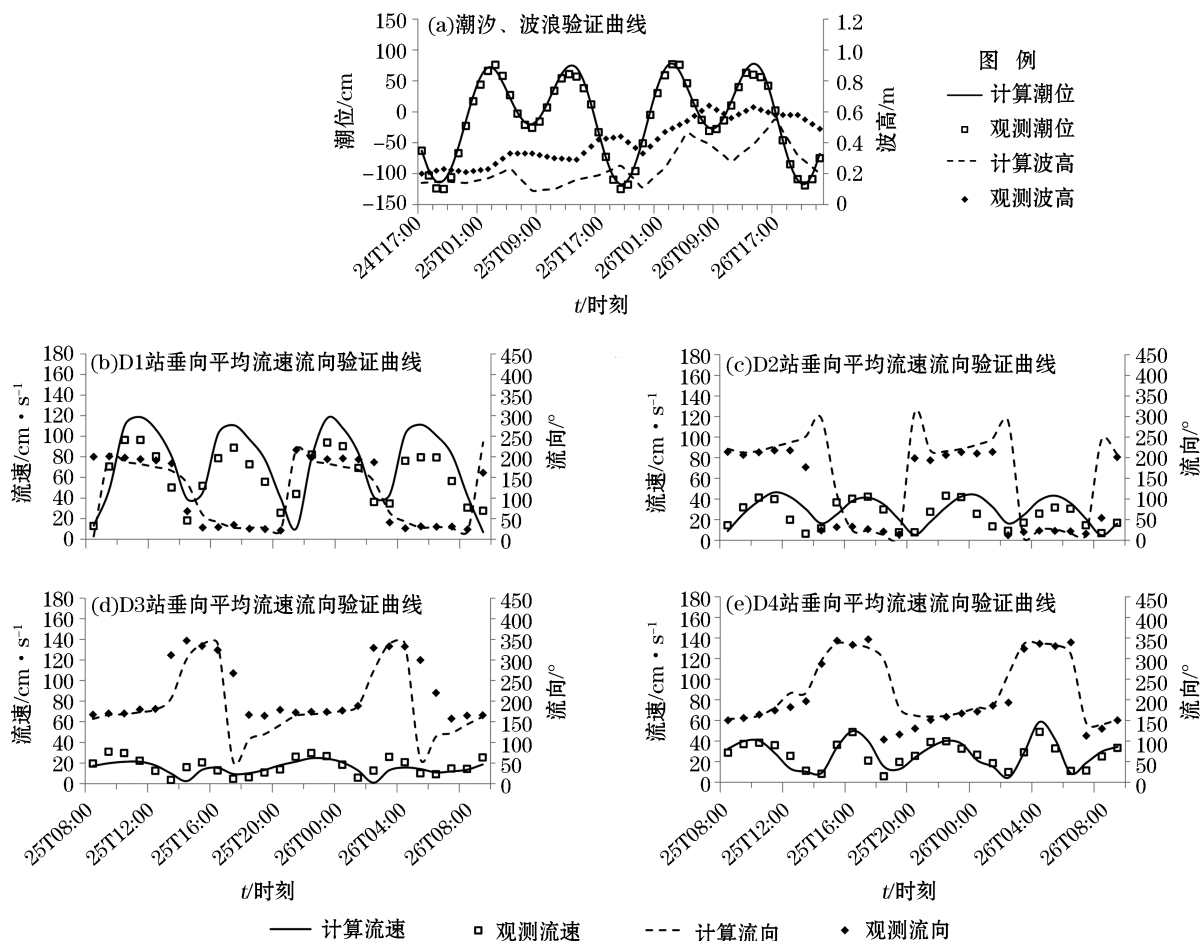


图5 2006-07 潮汐、潮流与波浪验证曲线

Fig.5 Validations of tide, current and wave in 2006-07

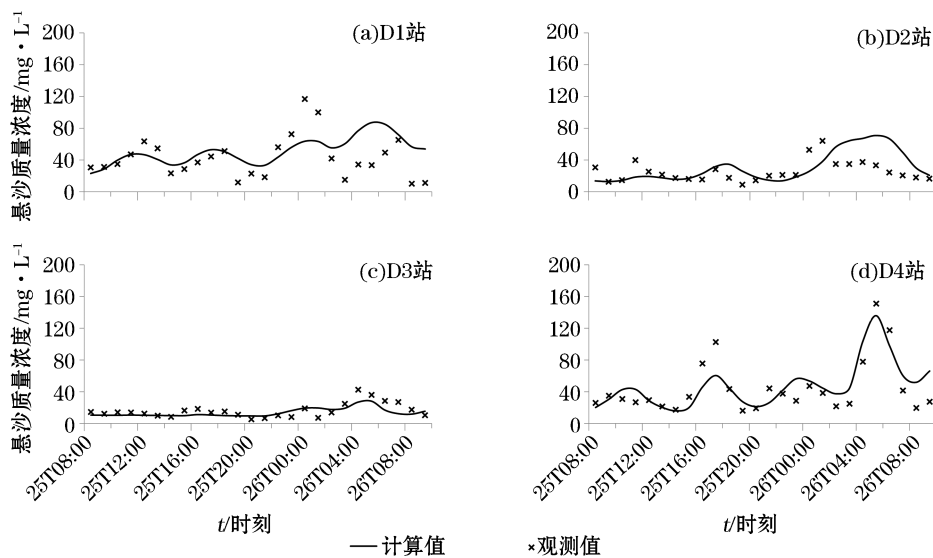


图6 2006-07 垂向平均悬沙验证曲线

Fig.6 Validation of suspended sediment concentration in 2006-07

3 讨 论

3.1 冲淤变化的空间分布

在所模拟的半月潮周期内,冲淤变化空间分布如图 7b 所示,图 7a 为 1980—2006 年测深得到的等深线变化情况^[7]。模拟结果显示,石岛海域整体处于弱侵蚀状态,淤积仅出现在镔榔岛东部,黑泥湾内近岸处冲淤基本平衡,远岸区域冲淤变化强于近岸。这种空间分布特征与 1980—2006 年实测等深线变化趋势一致,近 20 a 来,黑泥湾人为开发极少,主要为海带养殖^[2],且黑泥湾无河流泥沙输入^[5],因此,海域冲淤变化并不明显。

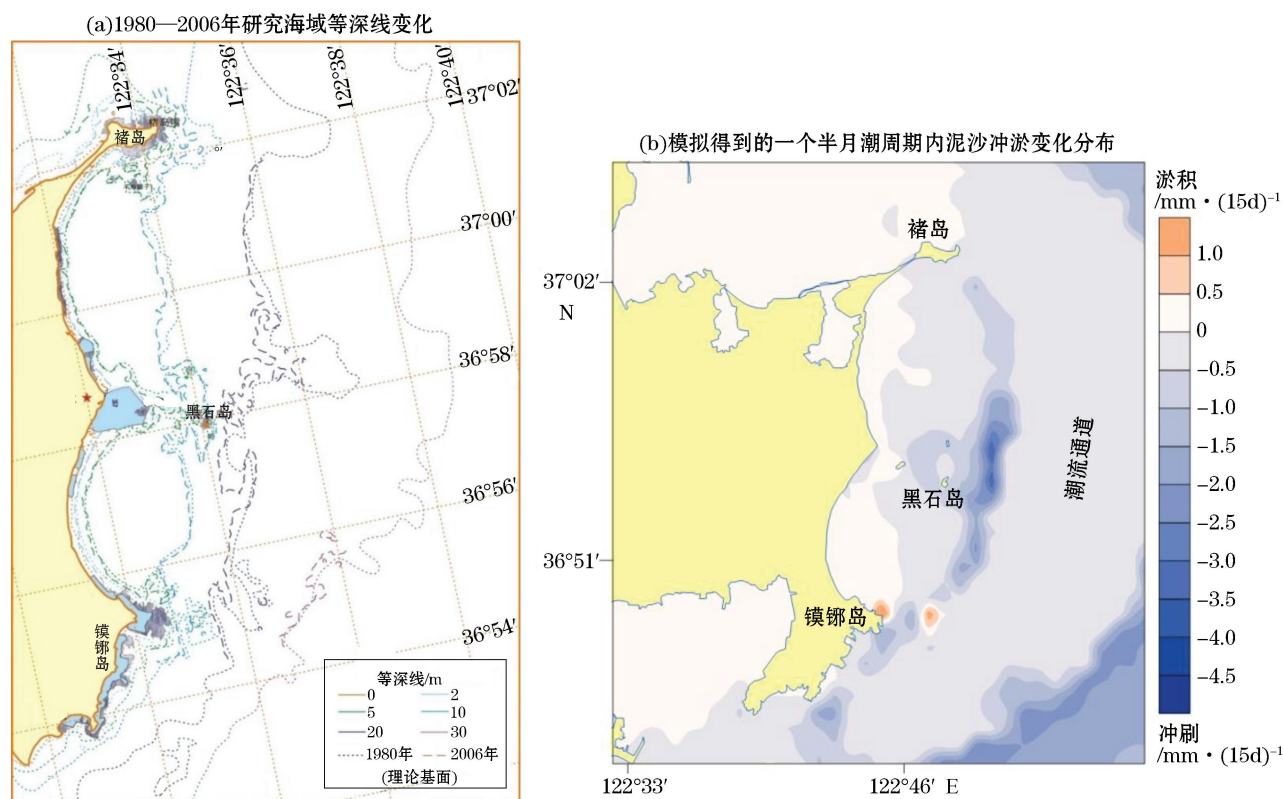


图 7 1980—2006 年研究海域等深线变化^[7]与一个半月潮周期内模拟冲淤变化情况

Fig.7 Variation of isobathes from 1980 to 2006 and distribution of simulated erosion and deposition during a fortnightly tide period

黑泥湾冲淤的空间变化与沉积物粒度具有相关性,潮流通道沉积物粒径较粗,褚岛东侧以粗砂、砾石为主;镔榔岛东南侧以砂为主;褚岛至镔榔岛之间潮流通道以推移质作为主要成分,粉砂、淤泥相对较少^[19]。因此,潮流通道内虽然涨落潮流速较高,但受到底质组成限制,冲刷强度有限。所模拟的半月潮周期内,潮流通道褚岛侧冲刷深度 0.14 mm,镔榔岛侧为 0.24 mm。

潮流通道西侧(黑石岛以东)冲刷最为剧烈,出现明显的 N-S 向带状冲刷区,在所模拟的半月潮周期内冲刷深度在 3.00 mm 以上,最大冲刷深度 3.50 mm。1980—2006 年等深线变化情况也反映出该区域冲刷强度较高,且距离黑石岛越近的区域,其冲刷强度越强。黑泥湾中部,黑石岛、老铁石及井口石之间海域,由于岛礁之间束水作用,冲刷强度较高,半月潮周期内冲刷深度为 0.72 m。黑泥湾沿岸海域冲淤变化十分微弱,

基本达到平衡状态,且由于粒径较粗,主要受波浪控制。沿岸海域模拟结果与等深线变化趋势一致,处于弱侵蚀状态。

结合特征站位(D1~D4)所在位置及观测、模拟结果,D1和D4两站悬沙质量浓度高于D2和D3两站,冲刷强度也明显高于D2和D3站。因此,一般情况下,悬沙质量浓度较高的站位泥沙运动活跃,其冲淤强度也相对较强。

3.2 波浪作用下的泥沙运移规律

黑泥湾海域敞开度高,NNE-SE向浪对研究海底海域作用显著,3—9月SE向浪出现较多,此外,夏季主导风向为SW,S向浪频率也较高。就本期观测而言,在最大波高时刻,黑泥湾受S向浪作用强烈,波浪场如图8a所示。褚岛、镆钁岛、黑石岛等岛礁南侧受波浪明显作用,而黑泥湾西南侧湾顶处,由于海湾掩护,波浪作用则相对较弱。

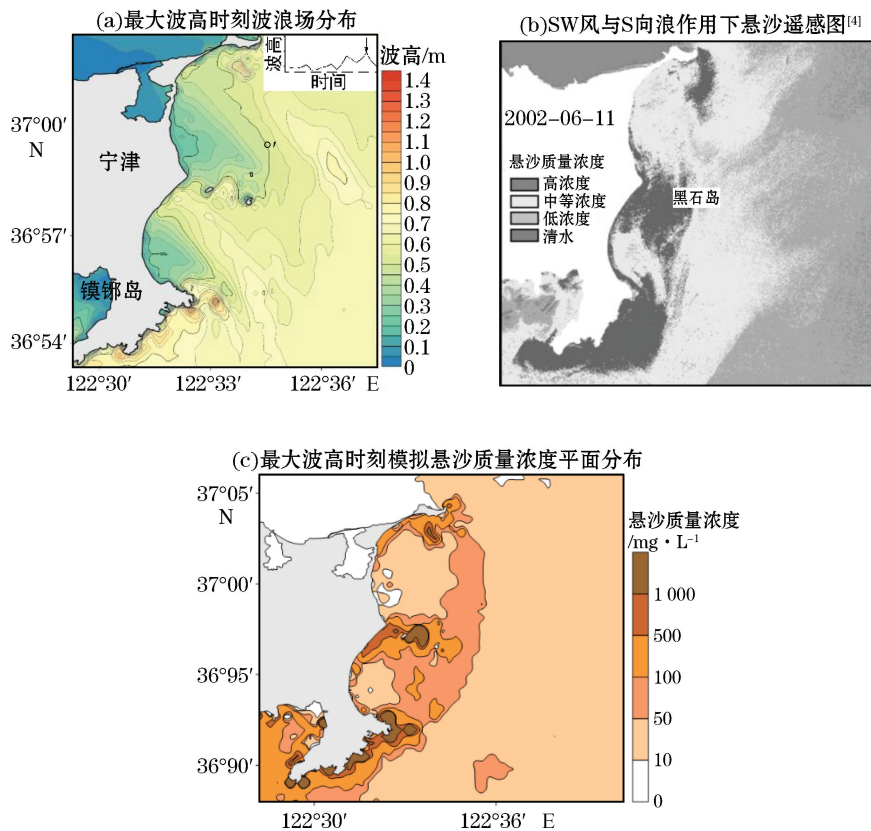


图8 模拟时段内最大波高时刻模拟波浪场、悬沙分布及夏季该浪向作用下海区悬沙遥感图

Fig.8 Distribution of wave height, suspended sediment and remote sensing map of suspended sediment at maximum wave height moment

在最大波高时刻,悬沙分布的模拟结果(图8c)与刘艳霞等通过遥感图像得到的悬沙分布结果^[4]近似(图8b)。悬沙分布体现出了与波浪场之间较强的相关性,在褚岛、镆钁岛、黑石岛等岛礁东侧、东南侧及南侧,悬沙出现高浓度区,其中,褚岛东侧最大波高0.72 m,悬沙质量浓度为113 mg/L,褚岛南侧最大波高0.87 m,悬沙质量浓度为1274 mg/L;镆钁岛东侧最大波高1.12 m,相应地,其悬沙质量浓度在该时刻为1948 mg/L,镆钁岛南侧最大波高1.09 m,该时刻悬沙质量浓度1967 mg/L;黑石岛东侧最大波高0.67 m,悬沙质量浓度583 mg/L;在黑石岛西侧,黑石岛、老铁石、井口石三处岛礁之间的海域,波高在0.53 m以上,最大波高0.76 m,悬沙质量浓度达到184 mg/L以上,最大质量浓度1564 mg/L。上述波高较大、悬沙质量

浓度较高的区域中,除褚岛周边海床沙源较少以外,其他区域均为冲淤变化较为剧烈的区域,其中以黑石岛东侧海域、镆铎岛东侧最为剧烈,其次为黑石岛等岛礁之间的区域。

由于黑石岛、老铁石、井口石三处岛礁对波浪、潮流的影响,黑泥湾中部、井口石西侧向海突出,因而岛礁将黑泥湾分为南、北两个海湾。在南北两湾各自的西南侧沿岸地区,则由于波浪作用弱,悬沙质量浓度较低(图 8c)。其中北湾西南侧沿岸处,最大波高小于 0.26 m,悬沙质量浓度在 31 mg/L 以下;南湾西南沿岸处,最大波高小于 0.25 m,悬沙质量浓度在 132 mg/L 以下。因此,在本期调查过程中,S 向波浪作用条件下,黑泥湾南北两湾各自的西南沿岸区,泥沙运动相对较弱,冲淤变化也因此并不明显(图 7b),而 1980—2006 年实测等深线变化情况(图 7a)也反映出该位置冲淤变化基本处于稳定状态,26 a 间仅出现微弱侵蚀,2 m 与 5 m 等深线仅有微弱退蚀。

对于黑泥湾沿岸区域,井口石西侧岸线突出处受到明显波浪作用,整个观测时段内最大波高 0.63 m,悬沙质量浓度最高 650 mg/L,因此该处冲淤变化相对沿岸其他区域较明显,所模拟的半月潮周期内冲刷深度最大为 0.59 m。但本次研究未能观测到极端波浪。根据尹超^[6]2013 年研究中采用的 2006-03—2007-03 波浪统计资料(观测位置位于黑泥湾北湾湾顶附近,与本次波浪站位相同),该区域 S 向浪浪高最大达到 1 m,强于本次观测(本期观测到的最大波高 0.63 m)。由于波浪作用主要影响的是 10 m 以浅水域,因此黑泥湾泥沙运动在极端波浪作用下,侵蚀强度会更加剧烈,但潮流通道外泥沙运动主要受潮流控制。从本次 4 站观测结果来看,位于黑泥湾北湾的 D2 站和近岸的 D3 站受波浪作用明显,而 D1 和 D4 站则主要受潮流控制,悬沙变化周期与潮流近似,且具有相位差。此外,本文所使用的 2010 年粒度资料与中国近海与海岸带调查图集粒度调查结果的空间分辨率不足,因此导致部分地区模拟结果与真实情况存在差异,特别是镆铎岛、黑石岛等岛礁周边区域,由于水动力条件较强,岛礁近岸区域底质类型可能以推移质为主,最终致使模拟结果高于观测结果。

3.3 潮流作用下的泥沙运移规律

流场模拟结果显示,研究海域以 N—S 向的往复流为主,涨潮流自北向南,落潮流相反(图 9)。在黑泥湾南北两端的褚岛、镆铎岛处流速较大,大潮期最大流速在镆铎岛东南侧达到 150 cm/s 以上。黑泥湾内余流场较为复杂,由于褚岛、镆铎岛及湾内黑石岛、井口石等岛礁影响,并在地形的共同作用下,岛礁周边余流涡旋较多,黑泥湾内大部分地区 1 个半月潮周期余流流速为 2~10 cm/s(图 10),潮流及余流模拟结果与尹超等 2013 年研究结果^[5]基本吻合。而在褚岛等岛礁附近,余流较强,所模拟的半月潮周期内流速大于 30 cm/s。

黑石岛东侧的 N—S 向带状冲刷区,在所模拟的半月潮周期内冲刷强度达到 3.00 mm 以上。1980—2006 年等深线变化情况也反映了该区域冲刷强度较大。带状冲刷区是在潮流为主、浪流共同作用下形成的,并受其底质类型影响。该处位于潮流通道西侧,涨落潮流较强,涨急流速 114 cm/s,落急流速 117 cm/s,带状冲刷区走向与涨落潮中间时潮流流向相一致,因此潮流冲刷是该区域的主要因素。其次,该处波浪作用强,且位于湾外和岛礁东侧,波浪掩护条件弱,各向波浪均对其产生较大影响,泥沙起动量较大,在余流作用下(图 10)泥沙主要向南侧运移。

冲刷带东侧为潮流通道,此处泥沙粒径较粗,褚岛至镆铎岛之间,自北向南逐渐从砾石变化为砂(图 2),起动能力较弱,且水深在 20 m 以上,波浪对海床作用较弱,因此潮流通道内虽然流速较大,但冲刷强度低于其西侧的带状冲刷区。潮流通道内余流也相对近岸海域较弱,余流流速在 2 cm/s 以下,本区悬移质起动后,难以迅速向周边海域输送,这也是冲淤变化不明显的原因之一。所模拟的半月潮周期内冲刷深度低,小于 0.50 mm。

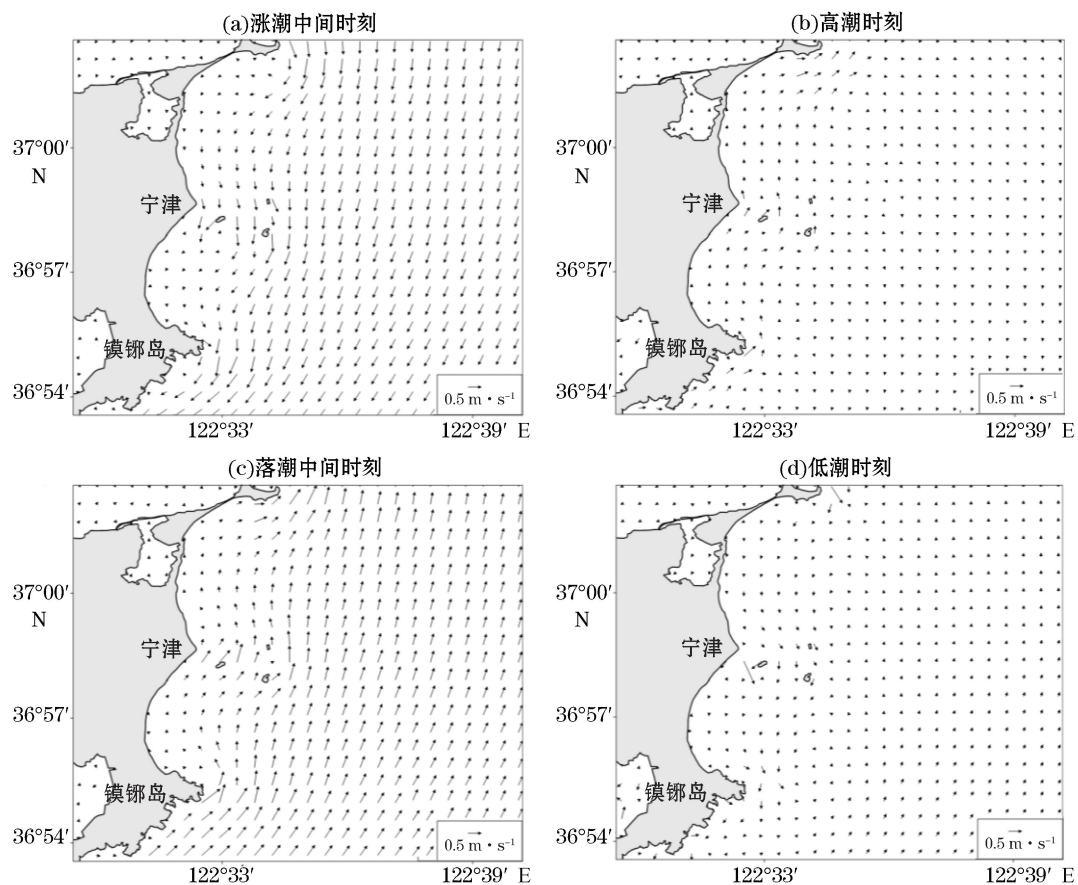


图9 涨落急与高低潮特征时刻流场

Fig.9 Current field at maximum flood, high tide, maximum ebb and low tide

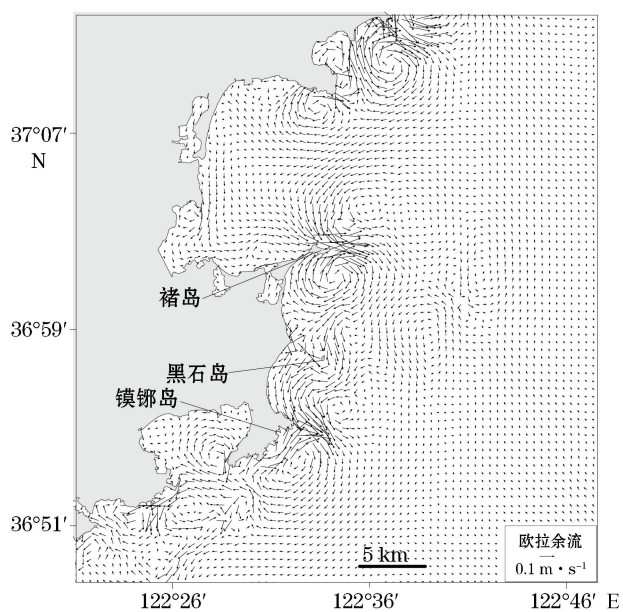


图10 1个半月潮周期内余流场

Fig.10 Distribution of Euler residual current during a fortnightly tide period

黑石岛以西、井口石以东海域,泥沙冲淤相对较强。该处流速在整个半日潮周期内始终较强(图 9),涨落潮中间时刻流速分别达到 81 和 84 cm/s,在高低潮时刻,潮流流速依然在 35 cm/s 以上,明显高于南北两侧流速。因此,该处受潮流影响,呈现相对明显的冲刷趋势,所模拟的 1 个半月潮周期内冲刷深度达到 0.72 mm。流速随时间变化的过程线与悬沙过程线之间会存在相位差。Dohmen-Janssen^[26]、Pritchard^[27]、Xie 等^[28]认为,海流与悬沙之间的相位差,主要因悬沙对海流的响应滞后而产生^[26-28],而 Bass 等认为,相位差是泥沙起动、沉降和水平输沙共同作用造成的^[22]。Dohmen-Janssen 认为,该相位差是局部冲淤的重要原因^[26]。本期观测到的海流与悬沙相位差约为 2~3 h(图 5 和图 6),因而在涨落急时刻约 2~3 h 后接近高低潮的时刻,悬沙质量浓度最高,此时岛礁之间束水区域流速明显高于其他海域,泥沙被带出该区,伴随发生侵蚀。1980—2006 年等深线变化结果也显示,岛礁之间束水区域冲刷较为明显(图 7a)。

模型结果与 1980—2006 年等深线变化结果均反映,镔榔岛东侧近岸海域泥沙冲淤最为复杂。从等深线对比情况来看,该处并没有明显的冲刷或淤积趋势,而是等深线退蚀与淤进随机分布。模拟结果显示,该处冲刷与淤积相间出现。为解析该位置冲淤变化趋势,选择临近的观测站 D4,对模拟的 1 个半月潮周期内冲淤过程线进行分析。该处以粉砂、淤泥为主,因此同时选择 D2 观测站代表黑泥湾北湾的冲淤变化过程,结果见图 11。图 11a 显示,D2 站在潮差大于 0.87 m 时,潮流剪切应力才能满足泥沙起动条件。之后,D2 站冲淤强度呈周期性变化,存在半日潮周期与半月潮周期,在 1 个半日潮周期内,涨落潮中间时刻冲淤变化最快,在高低潮转流时刻,冲刷或淤积达到 1 个周期内的极值。而在半月潮周期当中,潮流流速随着潮差的增加而增大,D2 站在 1 个半月潮周期内整体呈冲刷趋势,并在潮差下降到 0.87 m 后,泥沙停止起动,非本地起动的泥沙逐渐淤积,出现短期的回淤趋势。相比较而言,D4 站在 1 个半月潮周期内,冲刷或淤积两种趋势中的任何一种,均没有达到优势,说明 D4 站冲淤基本达到动平衡,冲刷与淤积状态此消彼长,并在随机波浪的作用下,动态平衡可能被改变(图 11b)^[29]。D4 站与 D2 站底质类型接近,潮差达到 0.87 m 以上时,潮流流速满足泥沙起动条件,潮差低于 1.4 m 时,起动量低于沉降量并开始淤积。在 1 个半月潮周期内,当潮差增加,D4 站将在整体上呈现冲刷趋势,当潮差降低后,开始发生淤积。综上分析,镔榔岛东侧海域的冲淤变化基本处于动平衡,虽然本期模拟时段在平面上呈现出冲刷、淤积间隔出现的分布,但不能代表镔榔岛东侧近岸局部海域夏季的净冲淤趋势,等深线对比结果也反映了这一结论。

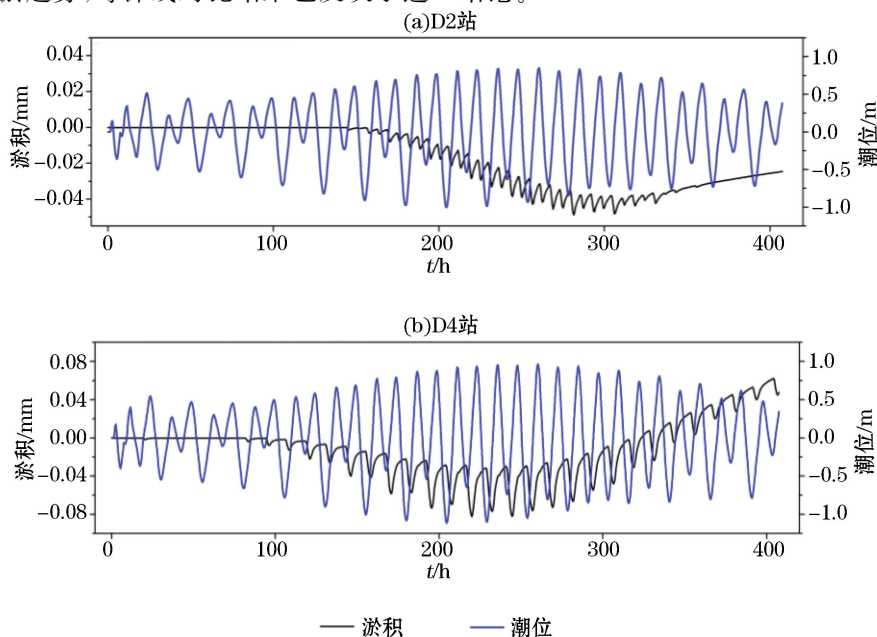


图 11 特征站位 1 个半月潮周期内冲淤量随潮位变化关系

Fig.11 Relationship among erosion, deposition and tide during a fortnightly tide period at characteristic stations

3 结 语

黑泥湾无河流泥沙来源,泥沙运动缓慢,岸线变化微弱,整体呈弱侵蚀状态。侵蚀最大速率发生在黑石岛东侧海域,其次为褚岛、镆铳岛东南侧海域及黑石岛、井口石等岛礁之间水域,湾外潮流通道的沉积物粒径较粗,以砾石和砂为主,粉砂、淤泥成分较少,侵蚀速率较低。黑泥湾沿岸区域侵蚀速率低,镆铳岛东侧近岸区域淤积与冲刷状态交替出现。

潮流通道西侧主要受较强的潮流作用,出现 N—S 向带状侵蚀区,走向与流主流向一致,且缺少波浪掩护条件,受波浪影响,冲刷趋势较强,半月潮周期内最大冲刷强度达到 3.50 mm。

黑石岛与井口石之间海域由于岛礁束水作用,流速较强,冲刷速率较高,半月潮周期内冲刷深度达到 0.50 mm,与潮流、悬沙过程线的相位差有关。该处波浪掩护条件较弱,水深在 10 m 以浅,波浪造成的冲刷也十分明显。

镆铳岛东侧近岸区域冲淤变化复杂。在半月潮周期当中,潮流流速随着潮差的增加而增高,逐渐开始冲刷,并在潮差降至 1.4 m 以下后,非本地起动的泥沙逐渐淤积,淤积趋势占据优势。该处冲淤基本达到动平衡,随半月潮周期变化,冲刷或淤积趋势交替占据优势,并在波浪的影响下,其平衡状态将发生变化。

参考文献(References):

- [1] MA L J, CUI Y C, WANG H R. Source of heavy metal contamination in Heini Bay sediments: a case study using factor analysis[J]. *Marine Geology Frontiers*. 2012(4): 57-61. 马立杰, 崔迎春, 王海荣. 运用因子分析评价山东黑泥湾沉积物重金属污染来源[J]. *海洋地质前沿*, 2012(4): 57-61.
- [2] YAN L W, HUANG H J, CHEN J T, et al. Distribution and enrichment mechanism of heavy metals in sediments of kelp-farming area in Heini Bay, China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*. 2010, 18(3): 398-407. 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 黑泥湾海带养殖区沉积物重金属分布特征与富集机制[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(3): 398-407.
- [3] MA L J, LI X Z, BI H B, et al. Distribution of heavy metals and environmental effect in intertidal sediments of Heini Bay in Shandong [J]. *Marine Environmental Science*. 2011, 30(1): 44-47. 马立杰, 李新正, 毕海波, 等. 山东黑泥湾潮间带沉积物重金属分布及其环境效应[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(1): 44-47.
- [4] LIU Y X, HUANG H J, FAN J Y, et al. Detection of distribution change and diffusion of suspended sediment concentration around Heini Bay[J]. *Marine Science*. 2009, 33(1): 25-29. 刘艳霞, 黄海军, 樊建勇, 等. 黑泥湾近岸悬沙分布与扩散变化监测[J]. *海洋科学*, 2009, 33(1): 25-29.
- [5] YIN C. Numerical simulation on random wave-induced erosion and deposition evolution in the Heini Bay[D]. Qingdao: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2013. 尹超. 随机波浪作用下黑泥湾冲淤演变的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- [6] YIN C, HUANG H J, YAN L W. Numerical simulation of random wave-induced erosion and deposition pattern in the Heini Bay[J]. *Marine Geology Frontiers*. 2013(5): 6-12. 尹超, 黄海军, 严立文. 随机波浪作用下黑泥湾冲淤演变的数值模拟[J]. *海洋地质前沿*, 2013(5): 6-12.
- [7] SONG Q G, YU D Y, GUO P. Research of typical shoreline evolution and cause analysis of Shidao Bay[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 32(3): 25-31. 宋庆国, 于定勇, 郭萍. 石岛湾典型岸线演变研究及成因分析[J]. *海岸工程*, 2013, 32(3): 25-31.
- [8] State Oceanic Administration, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation. Atlas of China's coastal zones and tideland resources survey: The second volume of Shandong Province. 1990. 国家海洋局, 国家测绘地理信息局. 1990. 中国近海与海岸带调查图集: 山东省第二卷.
- [9] FVCOM Team. An unstructured grid, finite-volume community ocean model FVCOM user manual[M/OL]. [2017-09-01]. <http://fvcom.smast.umassd.edu/fvcom/>.
- [10] SWAN Team. SWAN Cycle III version 40.51 Technical documentation[EB/OL]. [2017-08-05]. <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>.
- [11] ARIATHURAI R, ARULANANDAN K. Erosion rates of cohesive soils[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1978, 104(2):

279-283.

- [12] SOULSBY R L, WHITEHOUSE R J S W. Threshold of sediment motion in coastal environments[C]//Pacific Coasts and Ports Conference, Christchurch, New Zealand, 1997: 149-154.
- [13] ANDERSEN T J, FREDSOE J, PEJRUP M. In situ estimation of erosion and deposition thresholds by Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)[J]. *Estuarine Coastal Shelf*, 2007, 75(3): 327-336.
- [14] DE LINARES M, BELLEUDY P. Critical shear stress of bimodal sediment in sand-gravel rivers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(5): 555-559.
- [15] KENNEDY J F. The Albert shields story[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, 121(11): 766-772.
- [16] BUFFINGTON J M. The Legend of A. F. Shields[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(4): 376-387.
- [17] CAO Z, PENDER G, MENG J. Explicit formulation of the Shields diagram for incipient motion of sediment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(10): 1097-1099.
- [18] DAI Q, LIU C J, HU J, et al. Study on the curve-fitting for the Shields diagram and its uncertainty[J]. *Journal of Sediment Research*. 2014(6): 19-24. 戴清, 刘春晶, 胡健, 等. 希尔兹曲线的拟合及不确定性研究[J]. *泥沙研究*, 2014(6): 19-24.
- [19] PRANDLE D. Tidal characteristics of suspended sediment concentrations[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(4): 341-350.
- [20] ALDRIDGE J N. Optimal fitting of a model to observations of sediment concentrations in the Irish Sea[C]// American Society of Civil Engineers, Estuarine and Coastal Modelling Proceedings of the 4th international conference. San Diego, USA. 1996: 417-428.
- [21] JAGO C F, JONES S E. Observation and modelling of the dynamics of benthic fluff resuspended from a sandy bed in the southern North Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(18): 1255-1282.
- [22] BASS S J, ALDRIDGE J N, MCCAVE I N, et al. Phase relationships between fine sediment suspensions and tidal currents in coastal seas[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(C10): 1-14.
- [23] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China national standardization administration commission. Specifications for oceanographic survey: Part 8 Marine geology and geophysics survey; GB/T 12763.8—2007[S]. Beijing: Standards Press of China. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范: 第8部分 海洋地质地球物理调查; GB/T 12763.8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [24] DROPO I G, D'ANDREA L, KRISHNAPPAN B G, et al. Fine-sediment dynamics: towards an improved understanding of sediment erosion and transport[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15(2): 467-479.
- [25] RIJN L C V, WALSTRA D J R, GRASMEIJER B. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models[J]. *Coastal Engineering*, 2003, 47(3): 295-327.
- [26] DOHMEN-JANSSEN C M. Grain size influence on sediment transport in oscillatory sheet flow, phase-lags and mobile-bed effects[J/OL]. [2017-09-01]. https://www.researchgate.net/publication/27348810_Grain_size_influence_on_sediment_transport_in_oscillatory_sheet_flow_Phase_lags_and_mobile-bed_effects.
- [27] PRITCHARD D. Suspended sediment transport along an idealised tidal embayment: settling lag, residual transport and the interpretation of tidal signals[J]. *Ocean Dynamics*, 2005, 55(2): 124-136.
- [28] XIE M, ZHANG W, GUO W. A validation concept for cohesive sediment transport model and application on Lianyungang harbor, China[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(6): 585-596.
- [29] YU X X, GU D Q, YAN W W, et al. Lateral differences in sediments and geomorphology of the northern and southern typical sandy coasts in the eastern Shandong Peninsula and their genesis ——Taking the coasts of the Haiyang Wanmi Beach and the Weihai International Beach as the example[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 35(1): 33-46. 于晓晓, 谷东起, 闫文文, 等. 山东半岛东部南北岸典型砂质海岸沉积、地貌的横向差异及成因分析——以海阳万米海滩岸段和威海国际海水浴场岸段为例[J]. *海岸工程*, 2016, 35(1): 33-46.

Study on Dynamic Mechanism of Sediment Movement in Tidal Channel and the Firth Inside in Shidao Marine Area

ZHU Zi-chen, HU Ze-jian, LIU Jian-qiang, ZHANG Yong-qiang, XIONG Cong-bo, BIAN Shu-hua
(*The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The hydrodynamic condition is strong in the tidal channel in Shidao sea area. Heini Bay is located on the Shoreward side of the tidal channel, which is impacted by the wave action significantly. The sediment in the study area contains all of the types, which are gravel, sand, silt and mud. As a result, the sediment movement in the area is specific. Sediment movement in the area in summer was studied by applying the sediment module of FVCOM. The sediment incipient motion in the model was modified by the adoption of fitted Shields diagram. And the fraction distributions of multi-components were adopted to reflect the sediment distribution. The parameters calibration was based on the grain size analysis of sediment in the year of 2010. The simulated tide, current, wave and suspended sediment concentration were validated by the observational data in 2006 and the remote sensing map. The simulation of erosion and deposition was validated by the bathymetric data in 1980 and 2006. The results indicate that sediment in Heini Bay was in slightly erosional state. An north—south zonal erosion area occurred on the west side of tidal channel, and the maximum erosion thickness was 3.5 mm in the simulated fortnightly tide period. The channel was in a low state of erosion with high current speed because of coarse sediment on seabed. The sediment transport in east side of Moye Island was complicated, with erosional state dominating when tidal range higher than 1.4 m, and depositional state dominating when tidal range lower than 1.4 m, in the simulated period.

Key words: sediment erosion and deposition; combined wave-current action; tidal channel; FVCOM; Shidao marine area

Received: September 5, 2017