



鸭绿江河口潮汐及水沙输运特征研究

魏宝柱¹, 罗小峰², 路川藤²

(1. 丹东港口集团有限公司, 辽宁 丹东 276800; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 构建以鸭绿江河口为核心的大范围二维潮流泥沙数学模型, 研究新边界条件下的大东水道水沙输运特征。结果表明, 鸭绿江河口所在的海湾 M_2 分潮等潮时线总体呈南北方向, 潮流旋转方向为逆时针方向; 潮波自河口外侧向西水道方向, M_2 分潮振幅逐渐增大, 在庙沟港池附近达到最大, 潮波浅水变形口外与西水道变幅可达 20%; 大东水道深槽水流强度明显较大, 庙沟港池东南侧水域含沙量最大, 自一港池附近水域向外海含沙量呈降低趋势; 大东水道欧拉余流和斯托克斯漂流均向海, 落潮单宽潮量及单宽输沙量大于涨潮, 净潮量、净输沙量均向海, 大东水道泥沙输运以大潮期为主, 泥沙主要来源为西水道滩涂和大东水道东侧滩涂。

关键词: 鸭绿江河口; 大东水道; 数学模型; 水沙输运

中图分类号: U652; TV148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0024-08

Tidal and water-sediment transport characteristics in Yalu River Estuary

WEI Baozhu¹, LUO Xiaofeng², LU Chuanteng²

(1. Dandong Port Group Co., Ltd., Dandong 276800, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: We build a large-scale 2D tidal current and sediment mathematical model based on the Yalu River Estuary to study the water-sediment transport characteristics of Dadong waterway under the new boundary conditions. The results show that the M_2 tidal isochron of the bay where the Yalu River Estuary is located is generally in the north-south direction, the tide rotation direction is counterclockwise. The M_2 tidal amplitude gradually increases with the tidal wave from the outer side of the estuary towards the western waterway, reaching its maximum near the Miaogou Port Basin. The amplitude of the tidal wave deformation outside the mouth and in the western waterway can reach 20%. The flow intensity in the deep channel of Dadong waterway is obviously large, the sediment concentration in the southeast of Miaogou Port Basin is the largest, and the sediment concentration from the waters near the first harbor basin is decreasing. The Euler residual current and Stokes drift direction in Dadong waterway are seaward. The unit width tidal volume and unit width sediment transport volume at ebb tide are greater than that at flood tide. The direction of net tidal volume and net sediment transport volume is seaward. The sediment mainly comes from the mudflat of the west waterway and the mudflat on the east side of Dadong waterway.

Keywords: Yalu River Estuary; Dadong waterway; mathematical model; water-sediment transport

鸭绿江为中朝界河, 洪枯季径流差异明显, 多年平均径流量为 259.2 亿 m^3/a , 输沙量为 148 万 t/a ^[1]。鸭绿江河口是我国最北侧的入海河口, 潮差大、潮流强, 是典型的强潮河口^[2], 河口从平面看, 分为东水道、中水道和西水道(图 1), 其中东、中水道位于朝鲜境内, 西水道

位于中朝分界处。在人类活动及自然条件变化的作用下, 属河口冲积型岛屿的新岛、绸缎岛快速淤积, 西水道萎缩明显^[3-4], 20 世纪 70 年代西水道断航。由于鸭绿江河口跨国界, 水文泥沙资料相对较少。目前, 在河口水文泥沙方面的研究成果主要聚焦在早期河口的地貌演变^[5]、沉积物特

收稿日期: 2023-10-10

作者简介: 魏宝柱 (1979—), 男, 工程师, 从事港口与航道工程施工管理、规划建设。

征^[6-8]、水文泥沙特征^[9-10]等, 随着丹东港大东港区的快速发展, 大东水道的边界条件发生改变, 目前庙沟港池、一~三港池已建成, 庙沟港池和一港池已投产运营, 根据近年的港口运营资料分析, 港池内有一定的淤积量。鉴于此, 本文在大东水道新边界条件下, 构建鸭绿江河口大范围潮流泥沙数学模型, 深入研究大东水道水流泥沙输运特征, 为丹东港大东港区的建设提供技术支撑。

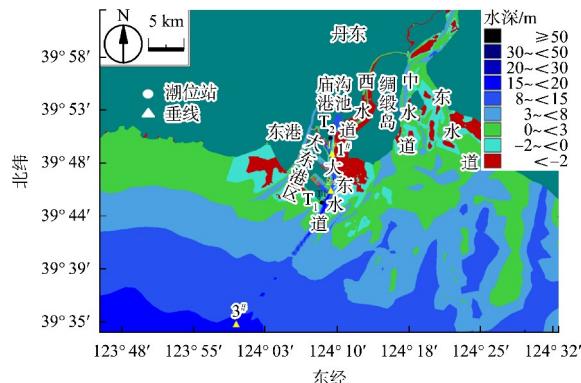


图1 鸭绿江河口河势

1 数学模型构建

1.1 研究范围与模型参数

对于基础水文泥沙资料相对较少的海域, 采用数学模型复演研究海域水动力泥沙运动, 进而研究其水流泥沙输运特征, 是较为有效的手段。本文采用二维潮流泥沙数学模型研究鸭绿江河口大东水道的水流泥沙运动特征。

本文采用 CJK3D 数值模拟软件构建数学模型, 控制方程与离散方法见文献[11]。模型上边界至丹东港浪头港区, 由于鸭绿江河口所在海湾潮流为逆时针旋转, 为准确模拟该现象, 外海边界至青岛海域与韩国群山海域连线, 模型范围见图 2。数学模型采用三角形网格作为计算单元, 大东水道局部网格加密, 最小网格边长约 22 m, 单元总数 11.355 7 万个, 数学模型外海地形采用最新海图地形, 大东港港区及航道采用 2018—2019 年最新实测地形, 基面统一至庙沟零点。数学模型时间步长取 0.5 s, 糊率随水深的变化而变化, 取值为 $0.012+0.013/h$ (h 为水深), 糊率上限为 0.025, 紊动黏性系数取 Khv^* (其中 $K=0.1$, v^* 为摩阻流速),

判断单元干湿的动边界临界水深取 0.01 m, 根据实测资料分析, 悬沙中值粒径取 0.012 mm, 挾沙力、泥沙起动流速公式分别采用张瑞瑾、沙玉清公式^[12], 分别为:

$$s_* = 0.04 \left(\frac{v^3}{ghw} \right)^{1.0} \quad (1)$$

$$v_c = \left[0.43d^{0.75} + \frac{1.1(0.7-e)^4}{d} \right]^{0.5} h^{0.2} \quad (2)$$

式中: s_* 为挟沙力, kg/m^3 ; v 为流速, m/s ; h 为水深, m ; w 为泥沙沉降速度, m/s , 取 0.000 4 m/s ; v_c 为泥沙起动流速, m/s ; d 为泥沙中值粒径, m ; e 为淤积泥沙孔隙率, 其稳定值约为 0.4。

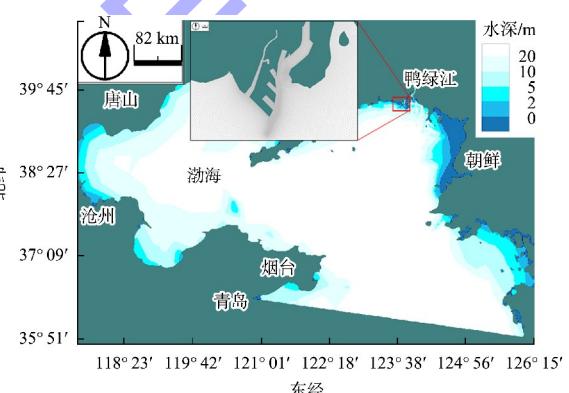


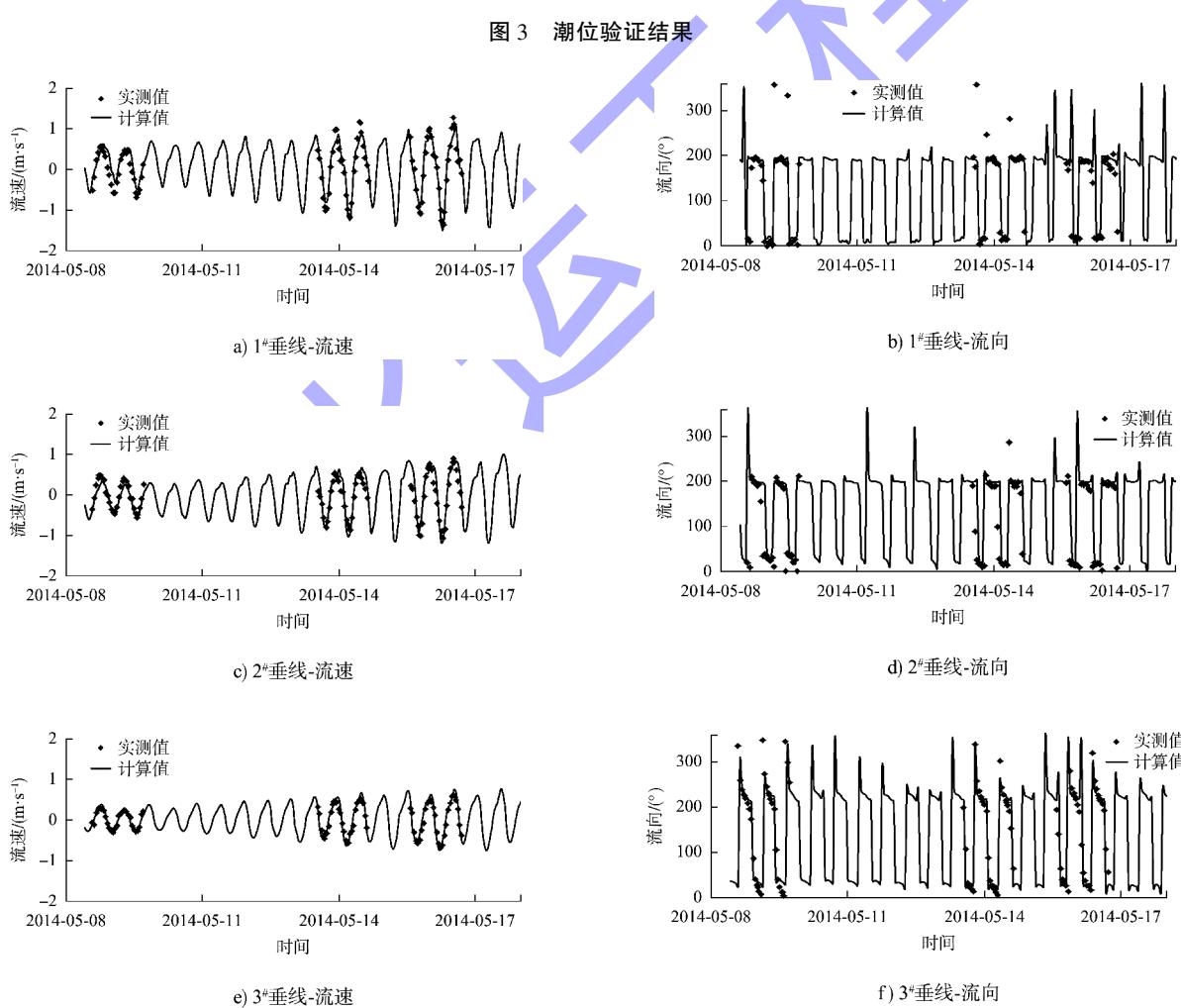
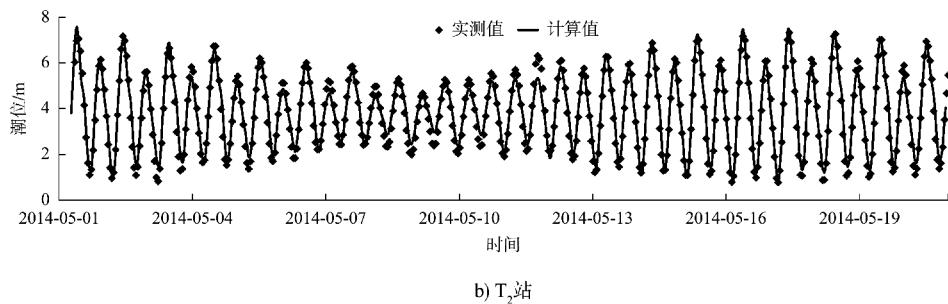
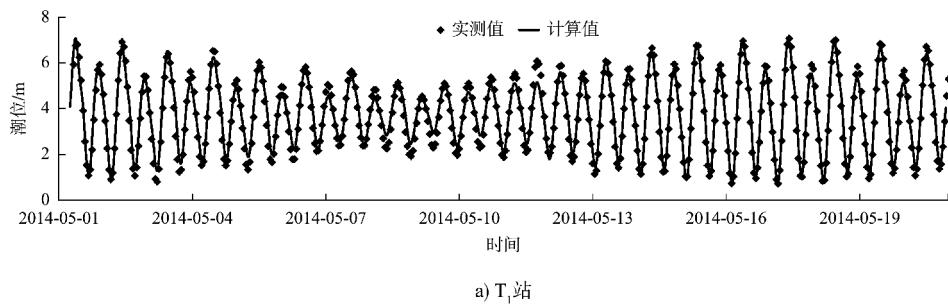
图2 数学模型范围及局部网格

1.2 模型验证

采用 2014-05-08—2014-05-16 的丹东港大东港区大-中-小潮同步水文资料对模型进行验证, 包含 2 个潮位站和 3 条垂线, 位置见图 1, 验证结果见图 3~5。数学模型的验证质量可用 S_{kill} 值表达, 其计算式见式(3), 当 S_{kill} 值为 1 时, 模型验证完美, S_{kill} 值越小, 计算偏差越大。本文 T_1 、 T_2 站潮位验证的 S_{kill} 值约为 0.98, 1#~3# 垂线流速验证 S_{kill} 值在 0.92~0.96, 1#、2# 垂线含沙量验证 S_{kill} 值分别为 0.47、0.70。总体来说, 潮位与流速验证精度较高, 含沙量由于泥沙运动理论的复杂性, 因此误差相对较大。

$$S_{\text{kill}} = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_{i,\text{mod}} - X_{i,\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n [(X_{i,\text{mod}} - \bar{X}_{i,\text{obs}}) + (X_{i,\text{obs}} - \bar{X}_{i,\text{obs}})]^2} \right\} \quad (3)$$

式中: $X_{i,\text{mod}}$ 为模型值, $X_{i,\text{obs}}$ 为观测值, $\bar{X}_{i,\text{obs}}$ 为观测平均值, n 为样本总数。



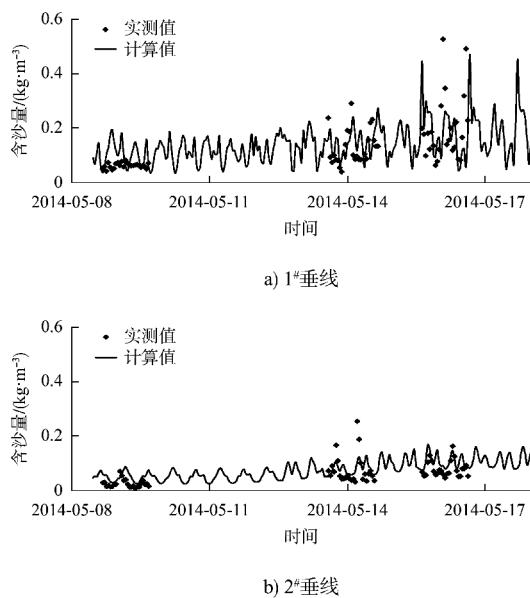


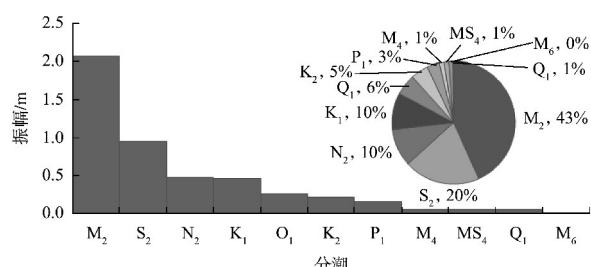
图5 含沙量验证结果

2 海湾、河口潮汐特征分析

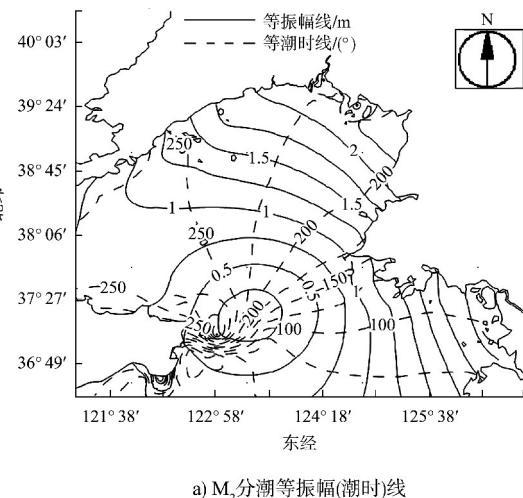
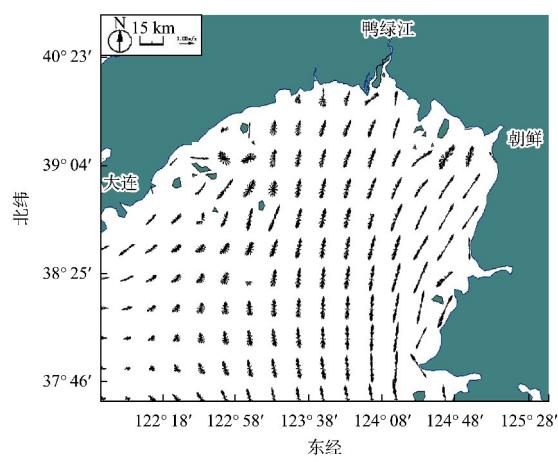
2.1 海湾潮汐特征分析

从实测资料及数学模型的验证结果看, 河口外侧海湾(3[#]垂线)潮流为旋转流, 旋转流的方向为逆时针, 与北半球正常的顺时针旋转流方向相反, 为分析该现象产生的原因, 本文从潮汐等振幅线、等潮时线等指标进行分析。

基于T₁站2014年5月整月潮位观测资料, 对其进行短期调和分析, 选取M₂、S₂、N₂、K₁、O₁、K₂、P₁、Q₁、M₄、MS₄、M₆共11个分潮, 调和分析所得分潮振幅见图6。可以看出, M₂分潮振幅值约为2.1 m, 占所有分潮振幅的43%, 可见M₂分潮在鸭绿江河口占绝对主导地位, 浅水分潮所占比例相对较小, M₄、MS₄、M₆振幅合计占比小于5%, 依据潮汐类型划分标准, 分潮波高关系($H_{O_1}+H_{K_1})/H_{M_2}$ 约为0.35($H_{O_1}, H_{K_1}, H_{M_2}$ 分别为O₁、K₁、M₂分潮振幅), 潮汐类型为正规半日潮。

图6 T₁站分潮振幅计算结果

河口所在海湾等振幅(潮时)线与流矢量分布见图7。由图7a可知, 由于烟台东侧海域无潮点的存在, 因此朝鲜一侧海域潮差明显大于烟台东侧海域, 鸭绿江河口所在海湾等潮时线总体呈南北方向, 东侧水域分潮相位在前、西侧在后, 因此该海湾潮流旋转方向为逆时针方向, 与北半球正常开阔海域的潮流顺时针旋转方向相反, 这可能是西水道持续萎缩的原因之一; 由图7b)可知, 靠近朝鲜侧海域潮流以往复流为主, 海湾中西部水域, 潮流具有一定的旋转流特征。

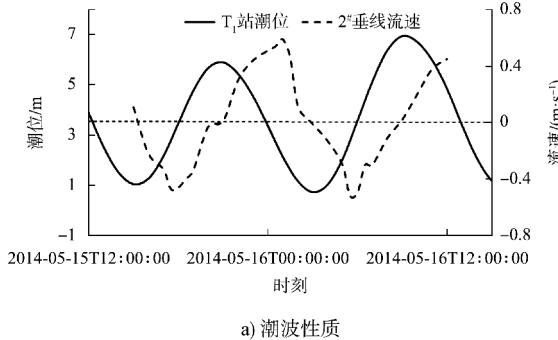
a) M₂分潮等振幅(潮时)线

b) 流矢量分布

2.2 河口潮汐特征分析

通过T₁潮位站与2#潮流垂线分析潮波性质, 结果见图8a)。可以看到, 流速最大发生在中潮位附近, 高、低潮位时, 潮流多为憩流状态, 说明河口处潮波具有较强的驻波特性。河口处大东

水道由于大东港区的建设，水道西侧形成硬质边界，东侧为滩地，在大东水道设置采样点，分析水道的沿程潮波传播特征，结果见图 8b)。潮波自河口外侧向西水道方向， M_2 分潮振幅在庙沟港池口门附近达到最大，约为 2.06 m，上游西水道由于水深浅， M_2 分潮振幅有所降低，口外 18#采



a) 潮波性质

样点与庙沟港池口门处的 2# 采样点， M_2 分潮振幅最大相差 0.16 m。全日分潮 K_1 分潮沿程变化较小，18#与 2# 采样点相差 0.02 m。浅水变形系数一般可用 M_4 与 M_2 的分潮振幅之比表示，由图 8b) 可看出，大东水道自河口外侧向西水道，潮波浅水变形逐渐加剧，系数变化幅度可达 20%。

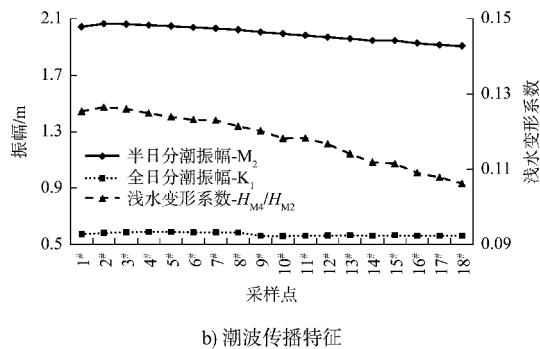


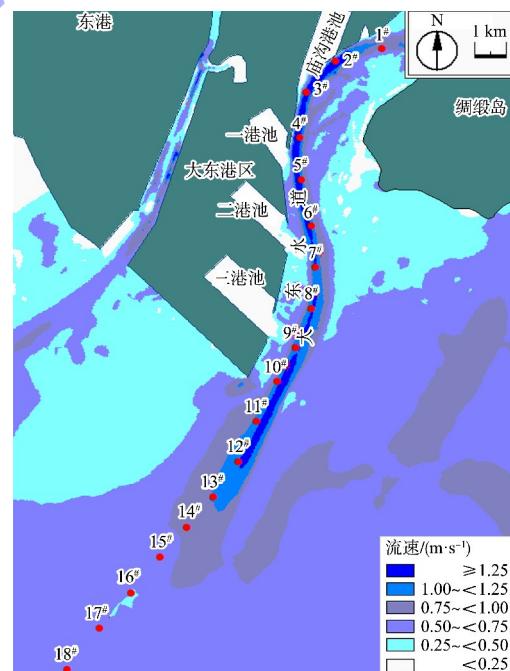
图 8 大东水道潮汐特征分析结果

3 河口水沙输运特征分析

3.1 大东水道水沙环境

根据实测水文测验资料分析，大东水道涨落急流速差别相对较小，以大潮期(潮差约为 6.1 m，潮差累积频率约为 2%)落急流速强度分布为代表，见图 9a)。通过分析大东水道的水流强度分布，大东水道为了满足大东港区的通航需求，其深槽水深常年维护，受地形及港区边界的影响，自庙沟港池至港区围堤外侧约 3 km 的深槽水域流速相对较大，最大流速基本均超过 1.0 m/s，深槽两侧的浅滩水域，流速强度较低，4 个挖入式港池内部流速均小于 0.20 m/s。大东水道及其附近水域的大潮最大含沙量分布见图 9b)，由于大东水道深槽以东的潮滩水深浅(落潮期很大一部分时间露滩)，由式(1)可看出，挟沙力与水深呈反比，因此潮滩水域在流速不大的情况下也可能获得较大的含沙量。由图 9b) 可看出，大东水道深槽以东的潮滩以及上游的西水道最大含沙量明显大于深槽以西水域，庙沟港池东侧及东南侧水域含沙量较大，

部分水域最大含沙量超过 1.0 kg/m³，自一港池附近水域向外海，最大含沙量呈降低趋势，外海开阔海域最大含沙量小于 0.1 kg/m³，4 个挖入式港池自口门向港池底部，含沙量逐渐减小。



a) 落急流速强度分布



图9 大东水道大潮流速强度(落急)与最大含沙量分布

3.2 大东水道水沙输运特征

欧拉余流指去除周期性天文潮后的平均流引起的平均输移, 大小和方向主要取决于潮周期内涨落潮流速强度和历时; 斯托克斯漂流表征水体的净漂移量, 其数值大小直接体现了潮周期内水

位变化量与流速变化量的相关性, 二者之和为拉格朗日余流。欧拉余流^[13]和斯托克斯漂流^[14-15]计算公式为:

$$u_E = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \bar{u} dt \quad (4)$$

$$u_S = \frac{1}{Th_0} \int_{t_0}^{t_0+T} h_i \bar{u} dt \quad (5)$$

单宽潮量及输沙量计算公式为:

$$Q_w = \int_{t_1}^{t_1+T_f} h_i \bar{u} dt \quad (6)$$

$$Q_s = \int_{t_1}^{t_1+T_f} h_i \bar{u} S dt \quad (7)$$

式中: u_E 为欧拉余流流速, m/s; u_S 为斯托克斯漂流流速, m/s; Q_w 为涨(落)潮单宽潮量, m^3/m ; Q_s 为涨(落)潮单宽输沙量, kg/m ; \bar{u} 为深度平均流速, m/s; t_0 、 T 分别为计算起始时间、计算潮周期时间, 本文 T 取 25 h; h_i 为水深, m; h_0 为潮周期平均水深, m; t_1 、 T_f 为涨(落)潮起始时间和历时; S 为含沙量, kg/m^3 。

统计了大东水道小潮期(潮差约 3.4 m, 潮差累积频率约 96%)和大潮期余流、单宽潮量和输沙量特征, 见表 1。

表1 大东水道余流、潮量、输沙量特征

潮汐	采样点	欧拉余流		斯托克斯漂流		单宽潮量/($m^3 \cdot m^{-1}$)			单宽输沙量/($kg \cdot m^{-1}$)		
		流速/($m \cdot s^{-1}$)	方向/(°)	流速/($m \cdot s^{-1}$)	方向/(°)	涨潮	落潮	净潮量	涨潮	落潮	净输沙量
小潮期	1 [#]	0.06	270.64	0.04	265.70	4.42	6.05	1.63	0.25	0.32	0.07
	2 [#]	0.07	237.09	0.05	241.20	10.19	12.63	2.44	0.45	0.69	0.24
	3 [#]	0.05	221.50	0.03	231.26	13.69	15.87	2.18	0.47	0.93	0.47
	4 [#]	0.04	178.59	0.03	176.13	14.28	14.85	0.57	0.42	0.59	0.17
	5 [#]	0.04	172.05	0.03	172.79	12.87	15.50	2.63	0.33	0.59	0.26
	6 [#]	0.02	153.99	0.01	138.54	19.25	20.01	0.76	0.44	0.64	0.20
	7 [#]	0.02	190.11	0.01	201.35	21.67	23.34	1.67	0.46	0.62	0.15
	8 [#]	0.04	205.37	0.03	207.71	21.89	25.84	3.95	0.45	0.61	0.16
	9 [#]	0.03	212.32	0.03	216.75	23.46	26.77	3.30	0.44	0.61	0.17
	10 [#]	0.03	208.22	0.03	210.25	24.99	29.74	4.76	0.46	0.63	0.16
	11 [#]	0.03	209.82	0.03	212.01	19.09	23.67	4.58	0.34	0.48	0.13
	12 [#]	0.08	211.90	0.06	213.35	14.44	28.22	13.77	0.27	0.63	0.36
	13 [#]	0.05	219.29	0.04	220.06	10.66	21.96	11.30	0.19	0.46	0.26
	14 [#]	0.03	224.32	0.03	225.16	7.87	15.47	7.60	0.13	0.28	0.15
	15 [#]	0.01	205.64	0.02	211.22	6.64	8.71	2.08	0.10	0.14	0.04
	16 [#]	0.01	39.08	0.01	32.25	11.78	10.42	-1.35	0.18	0.16	-0.02
	17 [#]	0.01	24.73	0.01	1.67	13.07	12.37	-0.70	0.19	0.18	-0.01
	18 [#]	0.01	58.52	0.01	43.05	14.20	13.62	-0.58	0.20	0.19	-0.01

续表1

潮汐	采样点	欧拉余流		斯托克斯漂流		单宽潮流量/(m ³ ·m ⁻¹)			单宽输沙量/(kg·m ⁻¹)		
		流速/(m·s ⁻¹)	方向/(°)	流速/(m·s ⁻¹)	方向/(°)	涨潮	落潮	净潮流量	涨潮	落潮	净输沙量
大潮期	1 [#]	0.14	277.56	0.12	273.96	9.07	14.03	4.97	2.00	3.69	1.69
	2 [#]	0.12	228.86	0.11	229.26	18.70	24.41	5.71	2.88	6.80	3.92
	3 [#]	0.10	215.90	0.06	231.53	25.65	29.40	3.74	3.38	7.67	4.30
	4 [#]	0.06	181.67	0.04	180.63	28.51	29.13	0.62	3.44	5.99	2.55
	5 [#]	0.04	179.77	0.02	230.09	28.42	28.67	0.25	3.10	5.80	2.70
	6 [#]	0.04	159.82	0.03	161.38	38.41	39.89	1.48	3.77	7.09	3.32
	7 [#]	0.06	179.35	0.04	182.86	40.59	46.12	5.53	3.57	6.81	3.24
	8 [#]	0.10	204.74	0.10	207.03	39.98	52.12	12.14	3.35	6.64	3.29
	9 [#]	0.09	207.28	0.09	209.66	41.01	52.23	11.22	2.70	6.08	3.38
	10 [#]	0.11	208.45	0.11	209.69	42.20	60.58	18.38	2.71	5.77	3.06
	11 [#]	0.11	214.42	0.12	215.33	32.33	50.60	18.27	1.85	4.20	2.35
	12 [#]	0.14	211.58	0.14	213.61	26.22	54.39	28.17	1.74	5.46	3.72
	13 [#]	0.12	217.94	0.11	219.49	21.52	43.73	22.21	1.44	3.89	2.45
	14 [#]	0.11	223.94	0.10	225.96	17.11	33.23	16.12	1.11	2.65	1.54
	15 [#]	0.04	222.49	0.05	226.92	15.47	21.15	5.68	0.93	1.44	0.51
	16 [#]	0.01	27.94	0.01	348.08	22.13	21.63	-0.50	1.17	1.24	0.07
	17 [#]	0.01	350.76	0.02	322.63	23.98	23.90	-0.08	1.09	1.17	0.08
	18 [#]	0.01	12.79	0.02	335.56	26.19	25.87	-0.32	1.05	1.02	-0.03

由表1可知, 小潮期大东水道1[#]~15[#]采样点欧拉余流和斯托克斯漂流均向外海, 即落潮流方向, 这与上游径流来水有一定关系, 小潮期欧拉余流和斯托克斯漂流值均相对较小, 基本不超过0.05 m/s, 外海16[#]~18[#]采样点, 欧拉余流和斯托克斯漂流向陆地, 即涨潮方向, 但量值较小, 均为0.01 m/s。涨落潮流单宽潮流量最大值均出现在9[#]、10[#]采样点, 主要因为在港池边界及滩槽地形作用下, 涨落潮流在此区域形成汇集, 以此为分界点, 向上游和下游涨落潮流单宽潮流量降低, 净潮流量方向与余流方向一致, 大东水道1[#]~15[#]采样点净潮流量向外海, 16[#]~18[#]采样点净潮流量向陆地。单宽输沙量不仅与潮流量有关, 还与含沙量有关, 大东水道涨潮流单宽输沙量在三港池外侧水域及庙沟港池外侧水域相对较大, 落潮流单宽输沙量庙沟港池外侧水域最大, 净输沙方向1[#]~15[#]采样点向外海, 16[#]~18[#]采样点向陆地。大潮期大东水道欧拉余流和斯托克斯漂流方向与小潮期一致, 但大潮期量值更大, 接近小潮期2倍, 1[#]~2[#]、10[#]~14[#]采样点欧拉余流和斯托克斯漂流值均超过0.10 m/s, 外海16[#]~18[#]采样点, 欧拉余流和斯托克斯漂流向陆地, 但量值较小, 均小于0.02 m/s。大潮期各采样点单宽潮流量趋势与小潮期一致, 但量值明显大于小潮。大潮期单宽输沙量远大于小潮, 说明

大东水道的泥沙输运以大潮期为主, 泥沙净输运方向均向外海, 由于西水道萎缩严重, 流域来水量相对较少, 因此径流来沙非主要沙源, 但由于该区域潮差大, 且西水道存在大量浅滩, 因此结合图9b) 可知, 大东水道深槽以东浅滩以及西水道滩涂是大东水道泥沙的主要来源。

4 结语

1) 鸭绿江河口为M₂分潮占绝对主导的强潮河口, 河口所在海湾M₂分潮等潮时线呈南北方向, 东侧水域M₂分潮相位早于西侧, 因此海湾潮流旋转方向为逆时针方向, 与北半球正常开阔海域的潮流旋转方向相反。

2) 河口处潮流运动为驻波, 自河口外侧向西水道方向, M₂分潮振幅逐渐增大, 在庙沟港池口门附近达到最大, 上游西水道由于水深较浅, M₂分潮振幅有所降低; 潮波浅水变形自口外至西水道逐渐加剧, 系数变化幅度可达20%。

3) 大东水道深槽大潮最大流速超过1.0 m/s, 两侧浅滩水域流速强度相对较弱, 庙沟港池东侧及东南侧水域含沙量最大, 自一港池外侧水域向外海含沙量呈降低趋势。

4) 大东水道欧拉余流和斯托克斯漂流均向海, 落潮流单宽潮流量及单宽输沙量大于涨潮, 净潮流量、净

输沙量为向海, 大东水道泥沙输运以大潮期为主, 泥沙主要来源为西水道滩涂和大东水道东侧滩涂。

参考文献:

- [1] 焉恒琦, 毛德华, 朱卫红, 等. 鸭绿江河口湿地近40年景观格局变化: 中朝对比[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2883-2894.
- [2] 盛辉, 高建华, 刘强, 等. 气候变化和人类活动对鸭绿江流域入海水沙通量的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 52-61.
- [3] 于欣. 鸭绿江河口最大浑浊带水动力特征与悬沙输运[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [4] 王励. 中朝界河鸭绿江河口段(虎山以下)河道演变分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] 张嘉军, 潘琼芝. 鸭绿江河口段河道演变分析[J]. 东北水利水电, 2009, 27(6): 38-39, 43.
- [6] 石勇, 刘志帅, 高建华, 等. 鸭绿江河口西岸潮滩沉积物有机质对流域变化的响应[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 115-124.
- [7] 李富祥, 张春鹏, 王路, 等. 基于表层沉积物粒度特征的鸭绿江口沉积环境分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(5): 100-106.

(上接第17页)

参考文献:

- [1] 黄洪城, 匡翠萍, 顾杰, 等. 河口咸潮入侵研究进展[J]. 海洋科学, 2014, 38(9): 109-115.
- [2] 贲婷华, 林仪, 凌小佳, 等. 河道低盐度自动监测系统综述及其设计应用[J]. 江苏水利, 2019(8): 47-50.
- [3] 丁行芯, 周华兴. 船闸防咸[M]. 北京: 交通部水运科技情报网, 1990: 41-43.
- [4] INCOM W G, DE MAERSCHALCK B. Saltwater intrusion mitigation in inland waterways [R]. Brussels: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2021.
- [5] WIJSMAN J. Panama Canal Extension: A review on salt intrusion into Gatun Lake [R]. Luxembourg: Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies, 2013.
- [6] 丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 等. 长江口盐水入侵研究综述[C]//中国海洋工程学会. 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京: 海洋出版社, 2015: 1042-1046.
- [7] 张彦清. 荷兰新建两座防咸省水海船闸[J]. 水运工程, 1986(11): 18.
- [8] SEIFFERT R, HESSER F. Investigating climate change impacts and adaptation strategies in German estuaries[J]. Die Küste, 2014, 81: 551-563.

- [8] 石勇. 鸭绿江河口潮间带沉积特征的阶段性变化及其对流域水沙通量变化的响应[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [9] 张寒元, 刘红, 龚鸿锋, 等. 鸭绿江口西水道水沙输移特征[C]//中国海洋工程学会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(中). 北京: 中国海洋出版社, 2011: 648-654.
- [10] 高峰, 孙连成, 麦苗. 鸭绿江河口潮流泥沙数值模拟[J]. 水道港口, 2009, 30(2): 89-95.
- [11] 孟江山, 路川藤, 罗小峰, 等. 基于GPU并行的厦门附近海域潮波传播数值模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(4): 424-433.
- [12] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [13] 施韩臻, 李占海, 汪亚平, 等. 枯季长江口南槽悬沙输运过程和机制研究[J]. 海洋通报, 2021, 40(6): 664-674.
- [14] 陈元杰, 程鹏. 中国东部海域潮汐余流特征及其动力分析[J]. 海洋通报, 2021, 40(4): 396-409.
- [15] 李若华, 唐子文, 谢东风. 强潮作用下钱塘江河口潮余流特征研究[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 8-12, 49.

(本文编辑 王璁)

- [9] INCOM W G. Ship behaviour in locks and lock approaches [R]. Brussels: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2015.
- [10] 林颖典, 熊杰, 刘雅钰, 等. 异重流在不同粗糙底面上运动特性的实验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 114-119.
- [11] 张朋. 径流和潮汐作用下的河口盐水入侵机理实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [12] ROTTMAN J W, SIMPSON J E. Gravity currents produced by instantaneous releases of a heavy fluid in a rectangular channel [J]. Journal of fluid mechanics, 1983, 135: 95-110.
- [13] YIN X, HE Y, LU C, et al. Experimental study on front spreading of lock-exchange gravity current with long lock length [J]. Journal of engineering mechanics, 2020, 146(1): 04019113.
- [14] BENJAMIN T B. Gravity currents and related phenomena[J]. Journal of fluid mechanics, 1968, 31(2): 209-248.
- [15] TURNER J S. Buoyancy Effects in Fluids[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.

(本文编辑 王传瑜)