

天津港水域围垦条件下的水动力变化分析

陈丹茜¹, 兰庭飞¹, 裴艳东², 杜家笔³, 汪亚平^{1,4}, 高建华¹

(1. 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 2. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170; 3. Texas A&M University at Galveston, Galveston 77554, USA; 4. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 本研究旨在讨论天津滨海新区的围垦对其附近水域水动力和悬沙输运所造成的影响, 并进行定量评估。在天津港南部、北部海域分别选取 4 个站位进行了全潮水文观测, 获取了流速剖面、悬沙浓度剖面数据, 并据此计算了底切应力、潮不对称性以及余流。结果表明, 底部悬沙浓度与流速、底切应力存在相位一致性, 绝大部分站位的沉积物都呈现向岸净输运的趋势, 悬沙通量分解显示潮汐捕捉项是该区域悬沙输运的主要贡献项; 围垦愈增的 2009~2015 年, 天津港北部潮不对称性增强, 向陆的单宽悬沙输运率由 20.15 g/(m·s) 变至 24.92 g/(m·s), 而南部海域潮不对称性减弱, 向陆的单宽悬沙输运率从 37.75 g/(m·s) 减小至 6.37 g/(m·s)。综上, 持续地围垦可能导致天津港附近海域的水动力条件改变, 推测北部潮滩淤涨可能加快, 而南部淤涨速率减小。

关键词: 天津港; 水动力; 潮不对称性; 沉积物输运

中图分类号: P736.21⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)10-0113-13

DOI: 10.11759/hyxx20190225001

围填海作为人类开发利用海洋的重要方式, 为世界上许多国家如荷兰、日本以及韩国的社会经济发展作出了重要贡献。我国沿海地区以 14% 的陆域土地面积承载着全国 40% 以上的人口, 同时创造了 60% 以上的国内生产总值^[1]。但日益增长的发展需求与土地资源不足之间的矛盾愈增, 围海造地成为解决用地矛盾、拓展生产和生活空间的重要手段。20 世纪 80 年代起, 随着天津经济技术开发区的建立以及天津港的快速发展, 天津港附近海域围海造地的规模逐渐增大, 截止到 2010 年底已经填海共 318 km², 遍及整个天津海岸线^[2]。围填海工程在较小尺度内剧烈改变海域自然属性, 可能对区域水动力、悬沙输运、海洋生态系统产生重要影响, 因此准确评估其影响程度以及理解影响机制尤为重要^[3]。

围填海工程会改变区域水动力条件, 导致纳潮量减少。如孟伟庆等^[4]研究发现围填海使天津滨海新区段海域纳潮量减少, 进一步影响了海洋污染物的稀释与扩散。戚健文等^[5]通过数值模型对曹妃甸围垦工程附近海域的潮流进行了相关研究, 认为围垦会导致潮流流速改变, 造成甸头附近的流速增大 10%~40%, 而在甸头东部前沿流速总体减少 10%~20%。Wang 等^[6]研究了江苏沿海潮滩在持续性围垦作用下的潮滩水动力和悬沙输运过程的响应机制, 发现持

续的围填海作用使得潮滩变窄变陡, 纳潮量显著减少, 从而削弱潮上带和潮间带的流速, 导致沉积物的迅速累积。

关于大规模围填海工程对其附近海域潮不对称性的改变, Song 等^[7]基于 POM 模型, 发现中国渤海、黄海和东海沿岸的围垦对潮汐动力具有远场效应, 导致其附近海域的潮不对称性明显增强。海湾潮滩的围垦也会导致潮汐特征的变化, 如 Gao 等^[8]对胶州湾的数值模型研究显示, 1935~2008 年间的大面积围垦显著加强了该海域的潮不对称性; Suh 等^[9]基于实测数据和 ADCIRC 模型结果, 发现韩国仁川港附近的海堤建设和围垦活动, 改变了海域的潮汐性质由“落潮主导”转变为“涨潮主导”, 而韩国“新万金滩涂围垦工程”的实施, 在减少附近海域 M₂ 振幅

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(41625021); 天津滨海新区海岸带环境地质调查评价(1212010814004)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41625021; Research and Assessment on Environmental Geology in Coastal Zone of Tianjin Binhai New Area, No. 1212010814004]

作者简介: 陈丹茜(1992-), 女, 浙江象山人, 硕士研究生, 从事海洋沉积动力学研究, E-mail: cdxdaissy@gmail.com; 裴艳东, 通信作者, 高级工程师, 从事水工环地质和第四纪地质研究, E-mail: tjpyd1978@163.com

的同时,还使得在黄海对面的山东海域的 M_2 振幅有所增强。这些工作均是通过数值模拟手段,来分析持续性围垦造成的区域潮汐特征变化。总体上看,在围垦活动中连续多年的现场观测资料仍较缺乏。天津港 2009 年以后又经历较大规模围填海,但人们仍对这些围填海造成水动力、潮汐不对称、沉积物运输的影响机制了解甚少。本文根据 2009、2014 以及 2015 年份的现场流速、悬沙浓度观测数据,计算潮汐不对称性与潮流不对称性,结合悬沙输运通量分解,旨在揭示围垦导致的地形改变造成的潮不对称性变化及其对沉积物运输的直接影响,并对近岸潮滩的近期演变趋势做出预测。

1 研究区概况

天津港位于渤海湾西岸,属温带季风气候,季风特征显著,常风向为南西-北东(SW-NE),波浪以风浪为主,平均波高 0.57 m,平均潮差为 2.47 m^[10-11]。天津港附近海域主要的水动力因素是潮汐,受不正规半日潮控制^[12],存在明显的涨落潮不等现象。潮流呈往复流运动,平均流速小于 0.3 m/s^[13],且悬沙浓度相对较低,为典型的低悬沙弱动力浅海环境。近岸广泛发育粉砂淤泥质潮滩^[14],并持续、缓慢地淤涨。该海

域潮滩的生长主要由于在潮汐捕捉效应下,悬沙向岸净输运^[15]。渤海湾目前潮滩新增沉积物主要来自黄河和滦河(海河自建闸后,已无沉积物入海),据观测,湾内存在双环环流结构湾内北部,在逆时针方向的环流作用下,以滦河物质为主的沉积物沿岸向西南运移,到达渤海湾北部;南部,老黄河口侵蚀的沉积物在顺时针作用下沿岸向西北方向的湾顶输送^[16-18]。

2 材料与方法

2.1 数据采集

2014 年 9 月 6—9 日和 2015 年 8 月 1—3 日,本文在天津港附近北部和南部水域共设置了 8 个站位(具体观测站位分布如图 1),进行了全潮沉积动力学观测,获得水深、流速、流向、浊度数据。其中,船载观测系统用 Teledyne RDI 1200 kHz 声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP)对流速剖面进行连续观测;每小时用光学后向散射浊度计 OBS-3A 进行垂线浊度剖面观测,同时以六点法同步采集现场水样,用以标定同步 OBS 浊度数据,从而获取高分辨率的悬沙浓度数据。引用杜家笔等^[15]所获得的 2009 年在该海域的观测数据(观测方法同上)作为比较分析,以研究围垦程度变化对潮汐水动力环境的影响。

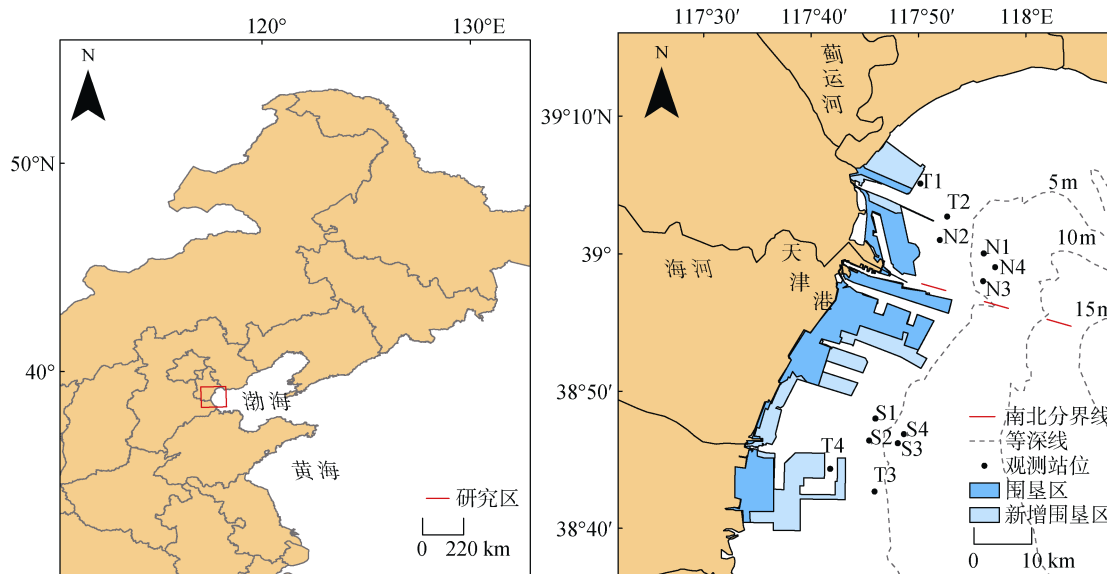


图 1 研究区位置、观测站位

Fig.1 Study area, locations of monitoring stations

注: 围垦区, 截止 2009 年; 新增围垦区, 截止 2015 年; 2009 年: T1-T4 站位^[15]; 2014 年: N1、N2、S1、S2 站位; 2015 年: N3、N4、S3、S4 位

考虑到研究区南北两部分围垦面积的差异(2009—2015 年, 这 6 a 期间, 南部新增围垦面积远大于北部), 以天津港及其垂直岸线延伸为界(即图 1 红色虚

线), 本文将研究区分为南、北两部分进行研究。同时根据站位邻近性比较原则, 将 2009、2014 以及 2015 年相同年份的邻近站位做比较, 以方便对比不

同围垦程度下潮汐和水动力的响应机制。

2.2 数据处理

2.2.1 流速和悬沙浓度

对 ADCP 获取的流速数据进行 5 min 平均处理, 然后通过坐标变换得到沿主、次流向的流速。

对天津港附近水域观测站点获取的现场同步水

样进行室内抽滤实验(滤膜孔径为 $0.45\ \mu\text{m}$), 烘干称重, 获取悬沙浓度。通过第三型线性回归方法^[19], 建立 OBS-3A 与现场悬沙浓度之间的相关关系(图 2), 从而将 OBS-3A 浊度数据转换为高时空分辨率的悬沙浓度。

观测过程中, N2 和 S1 站位 OBS 故障, 故采取 ADCP 声学强度反演来获取悬沙浓度(图 3)^[20]。

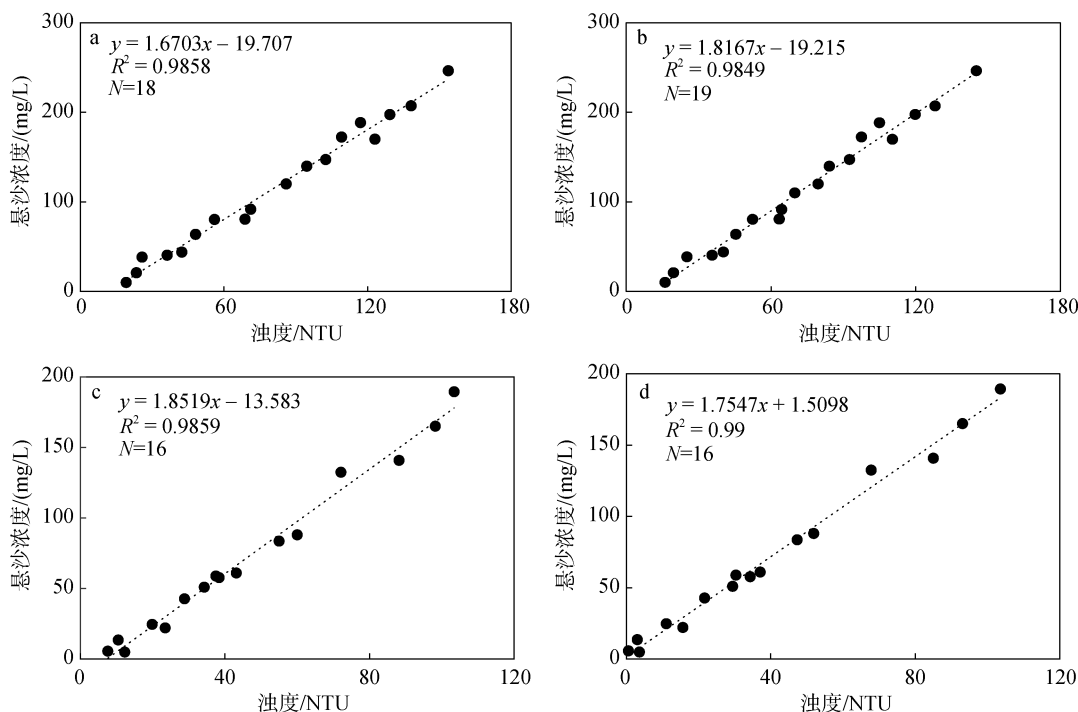


图 2 OBS-3A 与悬沙浓度的对比关系图

Fig.2 Linear relationships between turbidities measured by OBS-3A and suspended sediment concentrations (SSC) of water samples, with the linear equation

注: y : 悬沙浓度; x : 浊度; R : 相关系数; N : 相关数据个数; a: N1、N2 站; b: S1、S2 站; c: N3、N4 站; d: S3、S4 站

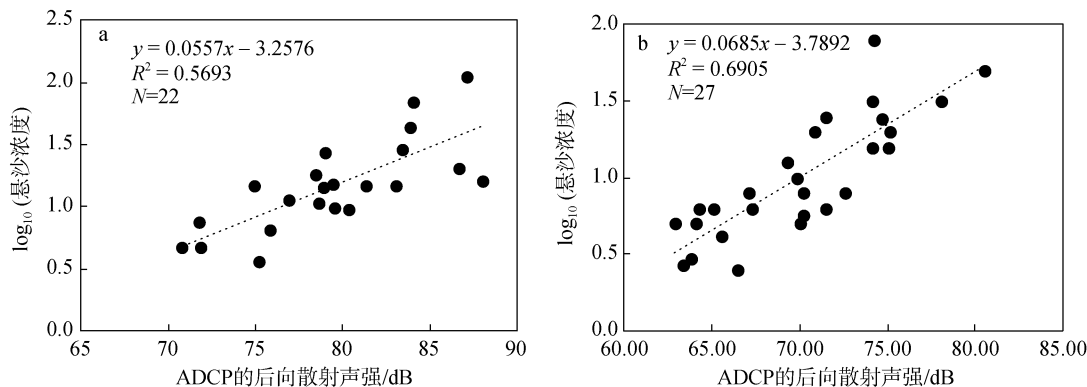


图 3 ADCP 声强与对应水样悬沙浓度的对比关系

Fig.3 Linear relationships between the logged back-scatter sound intensity from ADCP and suspended sediment concentration (SSC) of water samples, with the linear equation

注: y : 悬沙浓度的对数; x : ADCP 声强; R : 相关系数; N : 相关数据个数; a: N2 站; b: S1 站

2.2.2 潮不对称性

潮波进入近海,受水深、地形、岸线形状等影响发生变形,会产生潮不对称。对此,Nidzieko^[21]提出用偏度来定量潮不对称的方法,Song^[7]等修正潮汐不对称性计算公式为:

$$\gamma = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{E\left[(\zeta - \bar{\zeta})^3\right]}{\left(E\left[(\zeta - \bar{\zeta})^2\right]\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad \zeta = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad (1)$$

其中, η 为水位, t 为时间, ζ 为水位的时间导数, $\bar{\zeta}$ 为平均值, E 为期望值, μ_3 为求三阶矩, σ 为标准偏差, γ 为水位时间导数的偏度。当 $\gamma > 0$, 涨潮历时小于落潮历时; 当 $\gamma < 0$, 落潮历时小于涨潮历时。

而对于潮流不对称性, 则采用 Nidzieko 和 Ralston^[22]提出的以潮流奇数原点矩作为度量方法, 如公式(2):

$$\gamma_0 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}, \quad \mu_m = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N u_i^m, \quad (2)$$

其中, μ_3 和 μ_2 分别表示流速的三阶原点矩和二阶原点矩。当 $\gamma_0 > 0$, 涨潮流占主导; 当 $\gamma_0 < 0$, 落潮流占主导。 u_i 为全潮内连续均匀分布的主流向垂线平均流速, N 为 u_i 的采样总数。

2.2.3 切应力

近岸边界层内平均流速往往满足对数分布, 因此可采用对数剖面法来计算底部切应力:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (3)$$

式中, u 为离海底高 z 处的流速, u_* 为摩阻流速, k 为卡门常数(通常取值为 0.4), z_0 为粗糙长度。对不同水深平均流线性回归, 可求得 u_* 、 z_0 , 从而可根据下式可计算底切应力^[23]:

$$\tau_b = \rho_w u_*^2, \quad (4)$$

式中, τ_b 为底切应力, ρ_w 为海水的密度。

2.2.4 沉积物通量的计算

根据 Dyer^[24]提出的沉积物通量的计算公式, 流速可分解成 $u = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u_v$, 其中 $\bar{u}_0$ 为垂线平均流速潮平均项, $\bar{u}_t$ 为垂线平均流速潮偏差项, u_v 为垂线平均流速偏差项。潮周期(T)内单宽输水量(Q)为:

$$\begin{aligned} \langle Q \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u dz dt = \bar{u}_0 \bar{h}_0 + \langle \bar{u}_t h_t \rangle = \\ &h_0 (\bar{u}_E + \bar{u}_S) = h_0 \bar{u}_L, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示潮平均, $\bar{}$ 表示垂线平均值, h 为水深,

h_0 为潮平均水深, h_t 水深潮偏差项; $\bar{u}_L$ 、 $\bar{u}_S = \langle \bar{u}_t h_t \rangle / h_0$ 、 $\bar{u}_E$ 分别是垂向平均拉格朗日、欧拉和斯托克斯余流, $\bar{u}_E = \bar{u}_0$, $\bar{u}_S = \langle \bar{u}_t h_t \rangle / h_0$ 。积分时长的潮周期 T 采用水位闭合的方法来确定。

同理, 悬沙浓度可分解为 $c = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c_v$, 因此单宽悬沙通量 F 为:

$$\begin{aligned} \langle F \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c dz dt = h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0 + \bar{c}_0 \langle h_t \bar{u}_t \rangle + \\ &\bar{u}_0 \langle h_t \bar{c}_t \rangle + h_0 \langle \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle + \langle h_t \bar{c}_t \bar{u}_t \rangle + \\ &h_0 \langle \bar{c}_v \bar{u}_v \rangle + \langle h_t \bar{u}_v \bar{c}_v \rangle = \\ &T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, c_0 为垂线平均悬沙浓度潮平均项, c_t 代表垂线平均悬沙浓度潮偏差项, c_v 为垂线平均悬沙浓度偏差项, 其余各项如上文所述。 T_1 ~ T_7 各项含义将在下文详细论述。

3 结果与讨论

3.1 流速与切应力

根据研究区测站流速矢量分解, 次流向流速比主流向流速小一个量级, 整体小于 0.1 m/s, 故后续讨论以主流向流速展开。

从 N1~N4、S1~S4 站位的流速剖面图(图 4)可以看出: 研究区域水动力条件较弱, 各站位主流向流速大多小于 0.8 m/s。最大流速出现在 N3 站位为 1.11 m/s, 这与杜家笔 2009 年在天津港附近 T1~T4 站位观测结果相似^[15]。近岸地形导致潮波变形, 南北测站存在着不同程度的潮不对称性, 但基本趋势一致, 均为落潮历时大于涨潮历时, 涨潮流速大于落潮流速(表 1)。涨急、落急时刻水体中上层出现流速极大值, 具有垂向分层现象; 憩流时段流速较小, 一般小于 0.20 m/s, 此时垂向分层不明显。

北部站位(N1~N4)主流向方向基本为 NW/SE, 落潮历时大于涨潮历时, 涨潮流速大于落潮流速。整个观测期间, 天津港 N1 站位涨潮最大瞬时流速为 0.62 m/s, 落潮为 0.46 m/s, 最大流速出现在中层水体, 垂线平均流速变化范围为 0~0.53 m/s; N2 测站涨、落潮最大瞬时流速分别为 0.48、0.26 m/s, 垂线平均流速涨潮大于落潮; N3 测站涨潮最大瞬时流速为 1.11 m/s, 落潮为 0.55 m/s; N4 测站涨、落潮最大瞬时流速为 0.79、0.45 m/s(表 1)。其中 N2 测站距离岸边最近, 因此流速较其他 3 个站位较小。

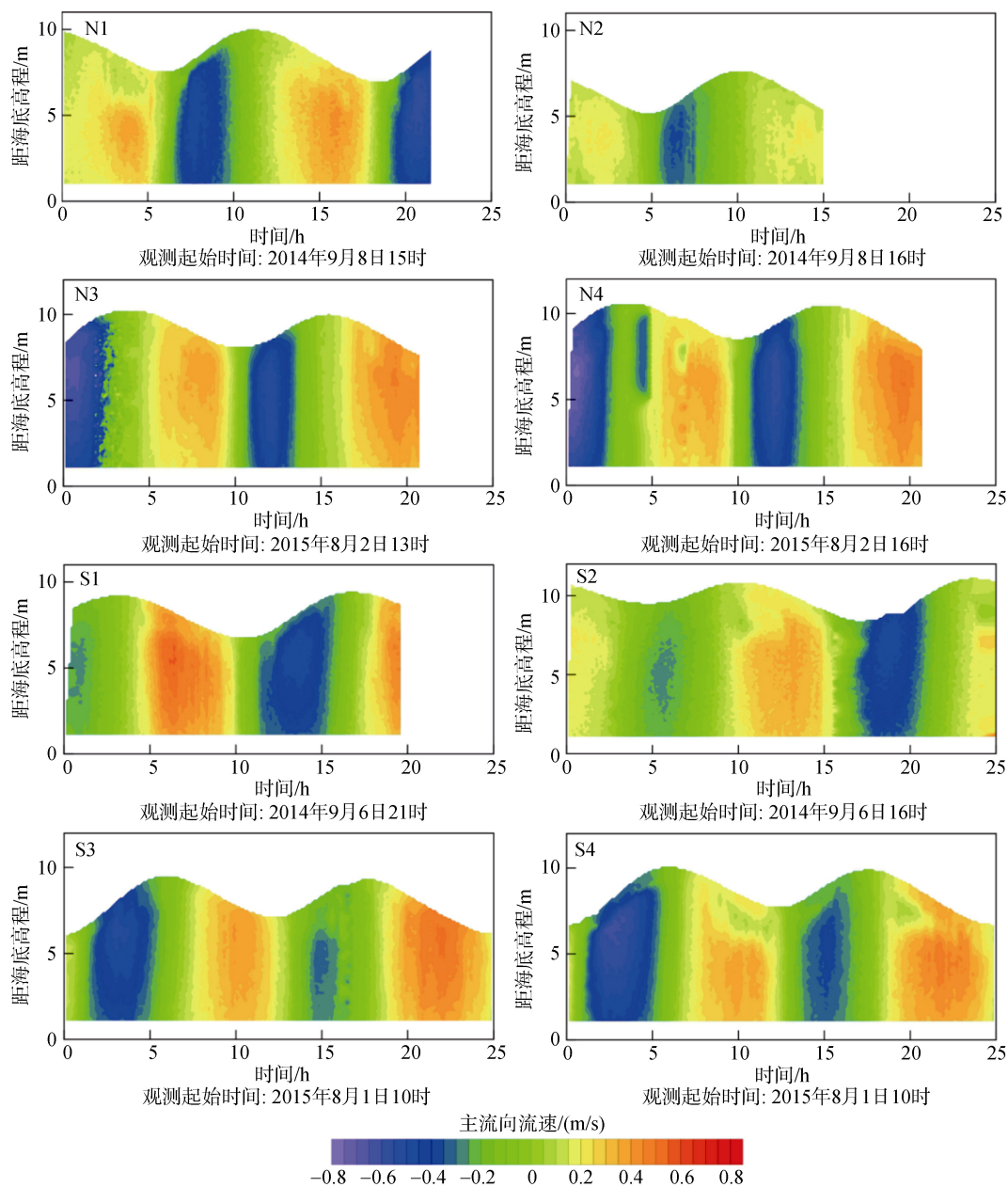


图4 N1—N4、S1—S4 测站全潮主流向流速剖面

Fig.4 Vertical profiles of velocity along the major-axis at station N1—N4 and S1—S4

表1 天津港全潮观测站位潮流特征值

Tab.1 Tidal characteristics of the monitoring stations near Tianjin Port

站位名称	涨(落)潮流方向/°	涨潮历时/h	落潮历时/h	涨潮垂线平均流速 (瞬时流速)/(m/s)	落潮垂线平均流速 (瞬时流速)/(m/s)
N1	327(147)	5.29	7.13	0.53(0.62)	0.37(0.46)
N2	330(150)	5.58	6.84	0.37(0.48)	0.20(0.26)
N3	320.5(140.5)	5.50	6.92	0.61(1.11)	0.42(0.55)
N4	316(136)	5.50	6.92	0.67(0.79)	0.45(0.51)
S1	245.5(65.5)	5.99	6.43	0.44(0.52)	0.50(0.57)
S2	261 (81)	5.82	6.60	0.44(0.52)	0.36(0.43)
S3	260(80)	5.97	6.45	0.46(0.55)	0.47(0.54)
S4	259(79)	5.60	6.82	0.54(0.63)	0.42(0.51)

天津港南面站位(S1~S4)的主流向方向与北部站位有所区别,为WSW/ENE,落潮历时大于涨潮历时,但涨落潮流速差异较小。S1测站最大流速为0.57 m/s,出现在落急时刻;S2测站具围垦区较近,整体流速较小,垂线平均流速范围为0~0.44 m/s;S3与S4站位的最大瞬时流速分别为0.55、0.63 m/s。流速极大值出现于中层水体,存在分层现象。

3.2 潮不对称性

根据Nidzieko^[21-22]提出的用偏度来度量潮不对称(潮汐不对称和潮流不对称),得到研究区内站位的潮不对称偏度值,计算所得的同一年份的相邻站位的潮不对称值较为接近,故在北部和南部各选取不同年份的3个站位进行比较,结果见表2。计算结果表明,天津港附近海域的潮汐不对称值 $\gamma > 0$,即涨潮历时小于落潮历时。在仅考虑潮汐作用的情况下,若涨潮历时小于落潮历时,则涨潮流强于落潮流;

同时潮流不对称性 $\gamma_0 > 0$,表明该海域是涨潮流占主导,可能导致潮滩继续淤涨。

在近岸及河口等人类活动频繁的浅水海域,潮不对称性主要由浅水效应所产生, M_2 分潮自身相互作用产生的 M_4 分潮是引起潮不对称的主要因素^[7, 25-26]。一般而言,离岸越近浅水效应越显著,潮不对称越大。对于北部测站,离岸距离 $T1 < N1 < N4$,仅考虑此条件时潮汐不对称(γ)值应当 $T1 > N1 > N4$ 。但计算结果表明潮汐不对称(γ)值 $T1(0.28) < N4(0.34) < N1(0.38)$,而这些站位观测时间均处于夏季,潮汐不对称的季节变化可以忽略,因此推测围垦导致的底部地形变化是影响北部潮不对称变化的重要原因。同样地,对于南部测站,离岸距离 $S1 < T3 < S4$,仅考虑此因素时潮汐不对称(γ)值应当满足 $S1 > T3 > S4$,而计算结果表明(γ)值 $T3(0.42) > S4(0.32) > S1(0.17)$,这意味着除离岸距离外,围垦是引起南部不对称性整体改变的重要因素之一。

表2 潮不对称计算结果

Tab.2 Tidal asymmetries of water level and tidal current at monitoring stations

位置	年份	站位	潮汐不对称(γ_0)	潮流不对称(γ_0)	海域面积/km ²	围垦面积/km ²
北	2009	T1	0.28	0.22	576.62	54.29
	2014	N2	0.38	0.96	552.42	77.08
	2015	N3	0.30	0.51	550.46	79.43
南	2009	T4	0.48	0.58	1 153.25	185.72
	2014	S2	0.26	0.33	1 073.86	264.62
	2015	S4	0.32	0.25	1 060.93	275.53

研究区北部,2009、2014、2015这几年随着围垦强度的增大,潮不对称性整体呈现增强的趋势。T1站位潮汐不对称(γ)值为0.28,N2站靠近围垦区, γ 值达到0.38,N3站离围垦区稍远, γ 值为0.30;潮流不对称(γ_0)也呈现同样的数值特征,其中N2站 γ_0 值达到0.96,北部潮不对称性整体有所增强。研究区南部,潮不对称性则呈整体减弱的趋势。T4站位,潮汐不对称(γ)值为0.48,S2、S4站位 γ 值分别为0.26、0.32;潮流不对称(γ_0)值也呈现类似特征,整体数值减少。潮流不对称是近岸海域沉积物净输移的重要方式^[27],南部海域潮流不对称性 γ_0 的降低,可导致向岸的净输移减弱,可能使南部潮滩淤涨变缓。对于南、北潮不对称性变化趋势的差异,一种解释是由于南部海域围垦多(如表2),使得潮间带面积基本消失殆尽,潮汐在浅水海域的能量耗散减弱,因此潮不对称减弱;北部围垦少,潮间带多数得以保持,潮不对称不会变弱。根据Zhu等^[28]在南黄海辐射沙脊群针对围垦引起潮能

再分布影响研究,围垦造成潮能向离岸方向耗散。而在天津港南部,围垦可能导致未能耗散的潮能转移到北部海域耗散,造成北部海域的浅水能量耗散更多, M_4 分潮增大,因此潮不对称性有所增加。

3.3 悬沙浓度

在天津港N1、N3、N4、S2、S3、S4共6个站位进行OBS垂线观测获得浊度数据,经过室内标定可得到浊度、悬沙浓度相关曲线(标定曲线见图2),从而获取悬沙浓度剖面时间序列(图5)。N2、S1站位OBS数据缺失,本文使用ADCP声学信号进行反演获取悬沙浓度剖面,但在近表层的结果可能存在误差。研究区悬沙浓度大多处于0~100 mg/L,是典型的低悬沙浓度海域,这与人研究结果基本一致^[15, 29]。悬沙浓度潮周期分布具有以下特点:悬沙浓度出现垂向分层现象,高值中心出现在近底部,由底及表悬沙浓度降低;落潮垂线平均悬沙浓度低于涨潮垂线平均。

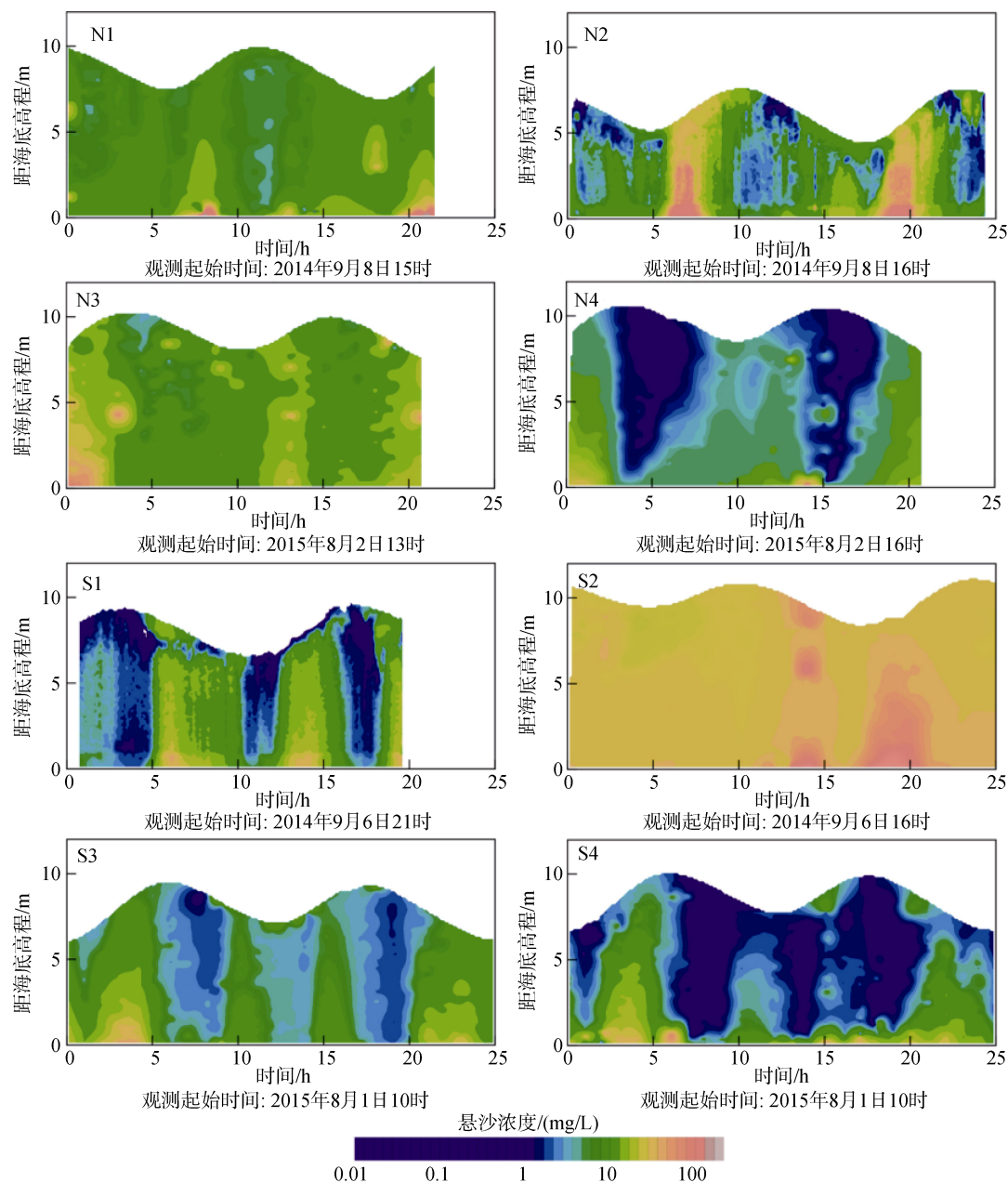


图 5 N1~N4、S1~S4 测站全潮悬沙浓度剖面时间序列

Fig.5 Vertical profiles of suspended sediment concentrations at stations N1-N4 and S1-S4

现场观测结果显示, 最大悬沙浓度出现在 N1 测站初涨时刻近底部, 可达 313.25 mg/L, 总体上看 S2 在整个潮周期内悬沙浓度均较大; 最小悬沙浓度数据出现在 S1 测站表层水体, 为 0.01 mg/L。此外, N4、S4 站位在落潮阶段表层悬沙浓度也较小, 最低值分别为 0.23、0.05 mg/L。南北站位近底部悬沙浓度峰值出现时刻有所区别: 初涨时段均出现峰值, 此时再悬浮作用强烈; 落潮期间北部测站近底部悬沙浓度较低, 但南部站位出现峰值, 可能原因是南部站位涨、落潮近底部流速差异较小。憩流期间的悬沙

浓度基本小于 20 mg/L, 原因是流速较低时的悬沙沉降作用。对于北部站位: N1、N3 以及 N4 空间位置较接近, 初涨时刻近底部最大悬沙浓度分别为 313.25、94.94、264.32 mg/L; N2 站位虽然流速相对较小, 但较浅的水深使底部沉积物易被再悬浮, 初涨时刻最大悬沙浓度也可达到 165.55 mg/L。对于南部站位: 涨潮期间出现近底部悬沙浓度峰值, 其中 S1、S2、S3、S4 站位的最大悬沙浓度分别为 49.69、76.61、65.95、89.55 mg/L, 海表悬沙浓度处于较高水平; 落潮期间近底部也可能出现悬沙浓度峰值, 但此时

S3、S4 站位水体中上层悬沙浓度较低,基本小于 5 mg/L。特别地, S2 站位涨落潮悬沙浓度差异很小,落潮时出现悬沙浓度峰值,可达 66.47 mg/L,水体中上层悬沙浓度显著高于其他测站,维持在 20~30 mg/L 之间。

3.4 底切应力

利用流速剖面法可以计算近底部切应力,拟合过程中相关系数低于 0.75 的结果弃用。得到的结果显示:北部站位切应力多在 1 N/m² 内,最大值可达 1.26 N/m²;南部站位切应力计算值与北部站位类似,最大值可达 1.30 N/m² [15, 30]。从结果可以看出其变化趋势与悬沙浓度、流速的变化(图 4、图 5)较为一致,

三者相位基本相同。北部以 N2 站位作为代表,底部悬沙浓度、流速、切应力对比结果显示三者存在明显相关关系(图 6)。一次涨落对应一次悬沙浓度峰值,出现在涨流速最大时刻,此时切应力均值较大,底部存在较明显的再悬浮作用^[31];而在落潮期间,整体流速、切应力比涨急时刻偏小,在悬浮作用较弱,因此未出现悬沙浓度峰值。南部以 S1 站位为代表,涨、落潮期间近底部流速与切应力的大小均相近,因此一次半日潮可在涨、落急出现两次底部悬沙浓度峰值(图 7)。基于以上结果,可以判断在研究区附近海域再悬浮作用是悬沙浓度潮周期变化的主要控制因素。

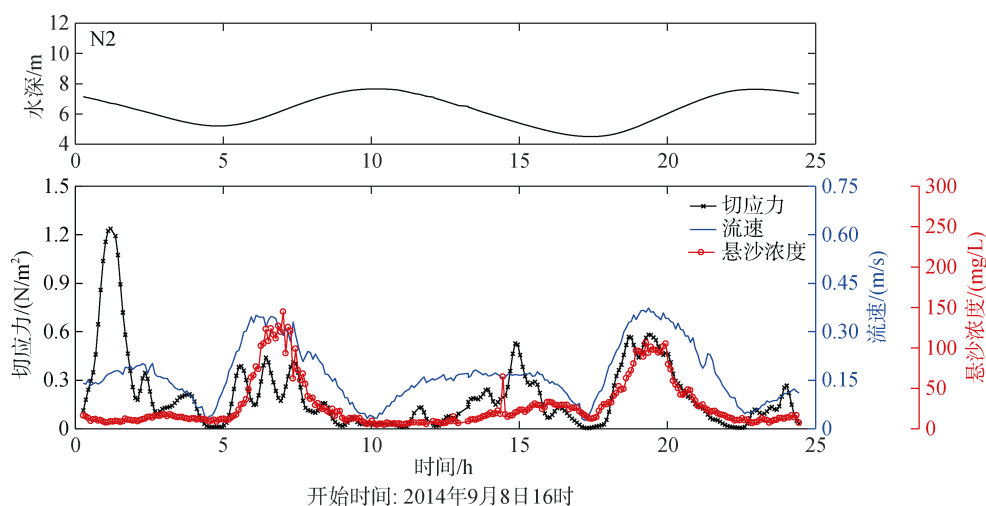


图 6 N2 测站底部流速、切应力与悬沙浓度对比

Fig.6 Time-series of bottom velocity, shear stress and SSC measured at station N2

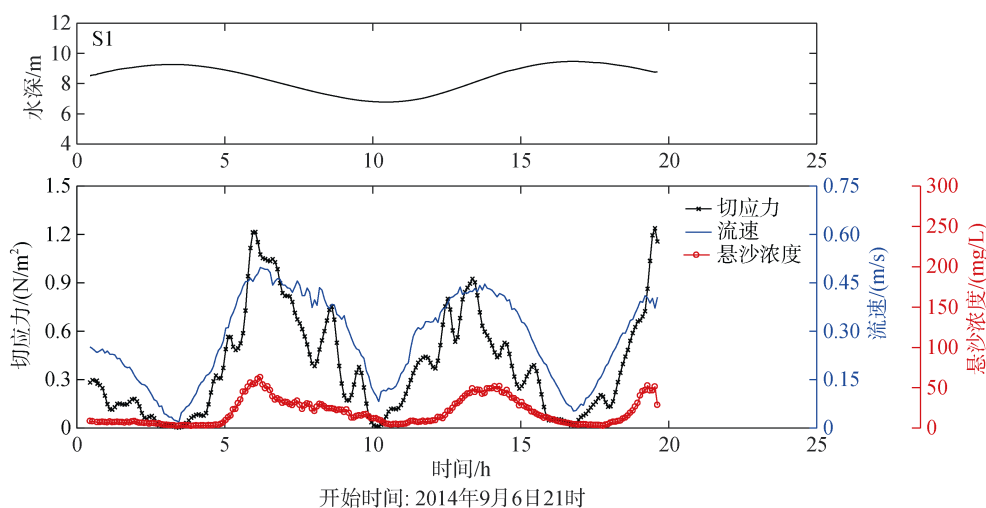


图 7 S1 测站底部流速、切应力与悬沙浓度对比

Fig.7 Time-series of bottom velocity, shear stress and SSC measured at station S1

表 3 天津港海域测站余流及单宽悬沙输运率

Tab.3 Residual currents and sediment fluxes at the monitoring stations

位置	年份	站位名称	平均水深/m	流速/(cm/s)			角度/°			悬沙输运率/(g/(m·s))	悬沙输运方向/°
				拉格朗日余流	欧拉余流	斯托克斯漂流	拉格朗日余流	欧拉余流	斯托克斯漂流		
北	2009	T1	4.83	1.71	1.44	0.97	120	80	177	15.47	324
	2009	T2	6.36	2.79	2.90	0.20	249	245	12	24.82	309
	2014	N1	8.88	2.52	2.35	0.26	44	39	91	19.65	331
	2014	N2	6.20	4.21	4.20	0.62	295	304	211	21.69	319
	2015	N3	9.24	8.90	9.05	0.30	342	340	104	38.35	323
	2015	N4	9.88	4.21	4.10	0.12	3	3	7	20	333
南	2009	T3	6.74	2.93	1.99	0.94	213	209	219	45.33	254
	2009	T4	5.97	3.85	3.06	0.90	266	273	241	30.17	263
	2014	S1	8.13	4.48	4.78	0.33	135	133	287	9.48	275
	2014	S2	10.18	2.04	2.23	0.21	81	79	234	7.69	90
	2015	S3	8.06	5.00	6.20	1.21	68	66	239	3.20	218
	2015	S4	8.66	1.16	1.78	0.80	357	17	228	5.11	273

3.5 余流及悬沙输运

从研究区域北部来看, 2009 年 T1 和 T2、2014 年 N1 和 N2、2015 年 N3 和 N4 站位的悬沙净输运方向均为西北, 这表明, 潮下带浅水区域的沉积物净向岸输运, 这 5 年内, 围垦并未改变近岸沉积物输运的方向。2009 年 T1 和 T2 测站计算得到的单宽悬沙净输运率数值分别为 15.47、24.82 g/s^[15]; 2014 年, N1 和 N2 站位分别为 19.65、1.69 g/s; 2015 年, N3 和 N4 站位 38.35、20 g/s, 这表明持续性围垦会导致沉积物净向岸输运率增大。

对于研究区南部, 2009 年, T3 和 T4 站位悬沙净输运方向为西南; 2014 年 S1 以及 2015 年 S3、S4 站位悬沙输运方向接近西偏北, 表明沉积物均为整体向岸运输; 但是 2014 年 S2 测站的悬沙净输运则为离岸方向, 这可能与 S2 站位涨、落潮期间悬沙浓度差异很小, 且中上层水体的悬沙浓度水平显著高于其他测站有关。单宽悬沙净输运率的结果如下, 2009 年 T3 和 T4 站位分别为 45.33、30.17 g/s^[15]; 2014 年, S1 和 S2 站位分别为 9.48、7.69 g/s; 2015 年 S3 和 S4 站位分别为 3.20、5.11g/s。总体而言, 随着围垦规模变大, 沉积物向岸净输运呈减弱的趋势, 可能原因是围垦导致天津港南部潮流不对称性变弱。

计算结果还表明, 整个研究海域欧拉余流相对较大, 在数值上与拉格朗日余流相当, 且 2009~2015 年, 随着围垦活动的加强, 欧拉余流和拉格朗日余流均有显著增大的趋势, 由潮汐变形引起的斯托克

斯漂流, 则随着围垦的进行呈现出减少的趋势。在南部研究区 2015 年的 S3 和 S4 测站由于观测期间处于大潮, 斯托克斯漂流数值出现显著增大。

3.6 悬沙输运机制

在悬沙输运通量分解公式(6)中, T_1 是非潮漂输运通量, 即欧拉(Eulerian)余流贡献项; T_2 项是潮流相关项, 称为斯托克斯(Stokes)漂移项; T_1+T_2 为拉格朗日(Lagrangian)平流输运; T_3 是潮汐与悬沙相关项; T_4 是悬沙与潮流场相关项, 亦称潮汐捕捉项; T_5 代表悬沙、潮流与潮汐相关项; $T_3+T_4+T_5$ 是潮泵(Tidal Pumping)效应的贡献项, 它是由潮相位差引起的。 T_6+T_7 是由悬沙垂向分布不均与流速垂直分布不均导致的相关项, 与剪切扩散有关, 其中 T_6 是由垂向悬沙浓度分层引起的重力环流贡献项, 它是由于近底床向陆的高物质浓度流和表层向海的底物质浓度流共同作用导致的; T_7 是潮波变形作用下垂向流速与悬沙浓度的变化引起的。特别地, 对于潮间带区域悬沙输运过程, T_7 与沉降冲刷延迟效应有关^[32]。根据以上计算结果, 并结合流速和悬沙浓度场的分布状况, 我们可以分析整个研究区的沉积物输运机制。

将悬沙输运通量按照净输运方向及其垂向两个方向进行矢量分解, 由于所得垂向输运比较小, 因而重点讨论净输运方向上的分量, 将结果除以总净输运量, 得到 $T_1\sim T_7$ 各项在净输运方向上的百分比(表 4)。结果显示, 拉格朗日平流项 T_1+T_2 和潮汐捕捉项 T_4 是影响该地区悬沙输运的主要因素。其中

表 4 通量分解后各分解项输运通量

Tab.4 Contribution of each component to net sediment fluxes

位置	年份	站位名称	$T_1/\%$	$T_2/\%$	$T_3/\%$	$T_4/\%$	$T_5/\%$	$T_6/\%$	$T_7/\%$
北	2009	T1	-12.72	-13.94	0.36	128.42	0.88	-2.89	-0.09
	2009	T2	8.89	0.62	0.18	85.90	5.23	-0.72	-0.10
	2014	N1	14.38	-2.36	-0.04	89.53	-0.57	-1.29	0.09
	2014	N2	62.11	-5.08	0.81	42.32	-1.80	1.53	0.12
	2015	N3	31.87	-0.88	-0.03	74.05	0.95	-5.82	-0.13
	2015	N4	25.65	0.68	0.25	75.25	1.50	-3.11	-0.22
南	2009	T3	6.54	3.59	-0.04	88.89	3.10	-1.91	-0.17
	2009	T4	18.65	5.18	0.52	76.04	2.06	-2.15	-0.30
	2014	S1	31.40	-4.25	0.18	87.88	-1.10	-13.34	-0.76
	2014	S2	111.77	-9.38	-0.09	3.58	-0.70	-5.58	0.40
	2015	S3	-61.63	11.55	-1.43	176.13	-4.75	-19.79	-0.08
	2015	S4	-20.22	16.50	0.45	98.74	16.87	-10.52	-1.82

注: 向海为负, 向陆为正, 其中 2009 年数据引自文献[15]。

Note: Negative value represents seaward, positive value represents landward, the data in 2009 was cited from literature.

拉格朗日平流项中, 欧拉余流项 T_1 占绝大部分, 斯托克斯漂移项 T_2 只占极小部分。垂向剪切和扩散项 T_6+T_7 在通量输运结果中贡献较小, 表明该地区垂向混合作用和垂向上的输运作用微弱。计算结果还显示, T_4 均大于 0, 即潮汐捕捉效应分量为正, 表明在天津港附近海域, 潮下带浅水区的悬沙在潮汐捕捉效应下呈向岸输运趋势。

从研究区北部来看, 2009—2015 年, 潮汐捕捉项 T_4 所在比重整体减少, 而欧拉余流项 T_1 整体比重有所增加。南部, 2009—2015 年, 潮汐捕捉项 T_4 比重则增加的趋势, 其中, S_3 , S_4 站位拉格朗日余流项的贡献值为负(即向海方向); S_2 站位欧拉余流项 T_1 所占比重超过了潮汐捕捉项 T_4 , 可能与其十分靠近围垦区有关。

4 结论和展望

在天津港附近海域进行了全潮水文观测, 结果表明研究区水动力条件较弱, 涨、落急时刻在水体中上层出现流速极大值, 流速具有垂向分层现象。北部 $N1-N4$ 主流向方向为 NW/SE, 涨潮流速显著大于落潮流速; 南部 $S1-S4$ 测站主流向方向为 WSW/ENE, 涨、落潮流速较接近。南北测站均存在落潮历时大于涨潮流速的现象。观测期间海域悬沙浓度大多在 100 mg/L 内, 属于明显的低悬沙浓度海域。近底部最大悬沙浓度出现在 $N1$ 站位初涨时刻, 达 313.25 mg/L; 最小悬沙浓度数据出现在 $N3$ 站位海水表层。

天津港附近海域底切应力基本处于 1 N/m^2 以

内。近底部悬沙浓度、流速、切应力之间存在相位一致性, 即底部流速越大, 底切应力越大, 导致再悬浮作用变强从而使底部悬沙浓度变大。北部测站近底部涨潮流速、切应力大于落潮, 因此悬沙浓度峰值往往出现于涨潮期间; 南部测站近底部涨、落潮流速、切应力相差不大, 因此一次半日潮可对应两次悬沙浓度峰值。

围垦并未改变悬沙净输移的方向。2009—2015 年, 围垦增强了北部的潮流不对称性, 导致北部海域向陆的悬沙净输移量变大; 而南部由于潮不对称性减弱, 向陆的悬沙净输移量变小。综上所述, 本文推测围垦工程可能导致天津港北部潮滩淤涨加快, 而南部潮滩淤涨速率变小, 且可能在潮下带出现侵蚀现象。未来可进一步采用模型来进行研究, 定量确定围垦的影响和贡献大小。以 2014—2015 年为例, 通过数值模拟, 可以获得与观测结果相一致的潮汐特征; 然后移除围垦区域, 再进行数值模拟, 两者的潮汐特征差异就是由于围垦所导致的; 移除围垦区域后的模拟结果, 可与 2009 年的进行比较, 以进一步确认围垦导致的潮汐特征变化。

本研究有助于理解人类活动(围填海)导致的潮动力和沉积物输运模式变化、海岸冲淤演化, 并为可能出现的海岸侵蚀提供科学对策和措施。在港口航道的某一侧, 不宜进行大规模围垦活动, 以免加剧局部海域的潮不对称、海底淤积造成疏浚成本显著增加; 在天津港南部海域, 应加强海岸防护, 避免海岸侵蚀造成损失。

致谢: 南京大学程高磊、陈景东、盛辉、朱庆光、王成龙以及晁海娟等参加了现场观测, 李小礼和熊吉连协助样品分析, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 何广顺. 海洋经济: 国民经济新的增长点[J]. 今日中国, 2012, 8: 20-23.
He Guangshun. Ocean economy: a new growth point of the national economy[J]. China today, 2012, 8: 20-23.
- [2] 吴文挺, 田波, 周云轩, 等. 中国海岸带围垦遥感分析[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5007-5016.
Wu Wenting, Tian Bo, Zhou Yunxuan, et al. The trends of coastal reclamation in China in the past three decades[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5007-5016.
- [3] 王勇智, 吴頔, 石洪华, 等. 近十年来渤海湾围填海工程对渤海湾水交换的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 471-480.
Wang Yongzhi, Wu Di, Shi Honghua, et al. Impact of reclamation on water exchange in Bohai Bay in recent decade[J]. Oceanology et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 471-480.
- [4] 孟伟庆, 王秀明, 李洪远, 等. 天津滨海新区围海造地的生态环境影响分析[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(1): 83-87.
Meng Weiqing, Wang Xiuming, Li hongyuan, et al. Ecological impacts of marine reclamation in Binhai New Area of Tianjin[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(1): 83-87.
- [5] 戚健文, 匡翠萍, 蒋茗韬, 等. 曹妃甸港口工程进展及其三维潮流场相应特征研究[J]. 水动力学研究与进展, 2014, 29(3): 346-353.
Qi Jianwen, Kuang Cuiping, Jiang Mingtao, et al. Study on the response characteristics of 3D tidal current field to the development of Caofeidian harbor project[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(3): 346-353.
- [6] Ya Ping Wang, Shu Gao, Jianjun Jia, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. Marine Geology, 2012(291-294): 147-161.
- [7] Dehai Song, X H Wang, A E Kiss, et al. The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(c12): C12007.
- [8] Gao, G D, Wang X H, Bao X W. Land reclamation and its impacts on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 151: 285-294.
- [9] Suh, S W, Lee H Y, Kim, H J. Spatio-temporal variability of tidal asymmetry due to multiple coastal constructions along the west coast of Korea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014(151): 336-346.
- [10] 丁卫东. 天津港区气候特点及对引航的影响[J]. 港口经济, 2010, 3: 52-53.
Ding Weidong. Weather characteristics of Tianjin Port and its influence of harbor transport[J]. Port economy, 2010, 3: 52-53.
- [11] 孙连成. 渤海湾西部海域波浪特征分析[J]. 海洋科学进展, 1991, 9(3): 50-58.
Sun Liancheng. Analysis of wave characteristics of the west offshore area of the Bohai Bay[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1991, 9(3): 50-58.
- [12] 刘爱菊, 张延廷, 黄易畅. 河北省海岸带潮汐特征[J]. 海洋科学进展, 1986, 4(3): 74-80.
Liu Aiju, Zhang Yanting, Huang Yichang. Coastal tidal characteristics of Hebei Province[J]. Advances in Marine Science, 1986, 4(3): 74-80.
- [13] 许婷, 孙连成. 天津港外航道水动力条件及工程泥沙淤积研究[J]. 中国港湾建设, 2008, 153(1): 26-30.
Xu Ting, Sun Liancheng. Research on hydrodynamics conditions and siltation in outer channel of Tianjin Port[J]. China harbor engineering, 2008, 153(1): 26-30.
- [14] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990, 10(4): 291-300.
Wang Ying, Zhu Dakui. Tidal flat of China[J]. Quaternary Sciences, 1990, 10(4): 291-300.
- [15] 杜家笔, 裴艳东, 高建华, 等. 弱动力浅海中的悬沙输运机制: 以天津港附近海域为例[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 136-144.
Du Jiabi, Pei Yandong, Gao Jianhua, et al. Suspended sediment transport associated with low flow patterns in shallow waters: a case study from the Tianjin subtidal area[J]. Acta oceanologica sinica, 2012, 34(1): 136-144.
- [16] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮流流及其对沉积物分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466-473.
Zhao Baoren, Zhuang Guowen, Cao Deming, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai sea[J]. Oceanology et Limnologia Sinica, 1995, 26(5): 466-473.
- [17] 雷坤, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾西岸潮间带沉积物粒度分布特征[J]. 海洋通报, 2006, 25(1): 54-61.
Lei Kun, Meng Wei, Zheng Binghui, et al. Grain size distributions of sediments in the intertidal zone on the west coast of the Bohai Bay[J]. Marine science bulletin, 2006, 25(1): 54-61.
- [18] 侯庆志. 渤海湾连片开发对于海岸滩涂动力环境及演变过程的影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013, 15-16.
Hou Qingzhi. Study for impacts of continuous development in Bohai Bay on coastal mudflat hydraulic environment and evolution process[D]. Nanjing: Nanjing

- Normal University, 2013: 15-16.
- [19] Gao Shu. A solution to the third type of linear relationships between two variables in earth sciences[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1997, 27(3): 373-381.
- [20] 魏晓, 汪亚平, 杨旸, 等. 浅海悬沙浓度观测方法的对比研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 161-170.
- Wei Xiao, Wang Yaping, Yang Yang, et al. Suspended sediment concentrations in shallow sea: comparative study of methods[J]. Marine geology & quaternary geology, 2013, 33(1): 161-170.
- [21] Nidzieko N J. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2010, 115(C08006): 1-13.
- [22] Nidzieko N J, Ralston D K. Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C03001): 1-17.
- [23] 汪亚平, 高抒, 贾建军. 海底边界层水流结构及底移质搬运研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 101-106.
- Wang Yaping, Gao Shu, Jia Jianjun. Flow structure in the marine boundary layer and bedload transport: a review[J]. Marine geology & quaternary geology, 2000, 20(3): 101-106.
- [24] DYER K R. Estuaries—A Physical Introduction[M]. New York: John Wiley and Sons, 1997.
- [25] Aubrey D G, Speer P E. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part I: Observations[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 1985, 21(2): 185-205.
- [26] Kreeke J V D, Robaczewska K. Tide-induced residual transport of coarse sediment; Application to the EMS estuary[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1993, 31(3): 209-220.
- [27] 时钟. 河口海岸细颗粒泥沙物理过程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- Shi Zhong. Physical Processes of Fine Sediment in Estuarine and Coastal Zone[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013.
- [28] Zhu Q, Wang Y P, Ni W, et al. Effects of intertidal reclamation on tides and potential environmental risks: a numerical study for the southern Yellow Sea[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(23): 1472.
- [29] 董景岗, 王海霞, 李伟. 天津近岸海水悬浮物的分布特征[J]. 盐业与化工, 2008, 37(6): 42-46.
- Dong Jinggang, Wang Haixia, Li Wei. Distribution feature of suspended sediment in Tianjin subtidal area[J]. Journal of salt and chemical industry, 2008, 37(6): 42-46.
- [30] 李占海, 高抒, 柯贤坤, 等. 江苏大丰潮间带粉砂滩的潮流边界层特征[J]. 海洋通报, 2003, 22(20): 1-8.
- Li Zhanhai, Gao Shu, Ke Xiankun, et al. Tidally-induced Boundary Layer Properties of the Silt Flat at Dafeng, Jiangsu Province, Eastern China[J]. Marine science bulletin, 2003, 22(20): 1-8.
- [31] 时钟. 河口海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程[J]. 海洋科学, 2000, 24(11): 26-30.
- Shi Zhong. Estuarine and coastal bottom boundary layer and fine sediment processes[J]. Marine sciences, 2000, 24(11): 26-30.
- [32] 陈景东, 汪亚平, 史本伟, 等. 长江口北港口门海域悬沙输运机制分析[J]. 海洋工程, 2014, 32(3): 45-54.
- Chen Jingdong, Wang Yaping, Shi Benwei, et al. Mechanisms on the suspended sediment transport in the mouth of North Channel of Yangtze River estuary[J]. The ocean engineering, 2014, 32(3): 45-54.

Hydrodynamics and sediment transport in response to sequential reclamations over subtidal waters near Tianjin Port

CHEN Dan-xi¹, LAN Ting-fei¹, PEI Yan-dong², DU Jia-bi³, WANG Ya-ping^{1, 4}, GAO Jian-hua¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Geological Survey Centre, of Tianjin China Geological Survey Bureau, Tianjin 300170, China; 3. Texas A&M University at Galveston, Galveston 77554, USA; 4. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Received: Feb. 25, 2019

Key words: Tianjin Port; hydrodynamic; tidal asymmetry; sediment transport

Abstract: Extensive reclamations along China's coast have potentially changed the hydrodynamics and sedimentary processes in the coastal waters. Their influence and underlying mechanisms require careful examination, particularly for waters near major ports where sediment siltation in navigational channels is a major concern. We collected monitoring data at eight stations during 2014–2015 in the vicinity of Tianjin Port, around which sequential reclamations were conducted over recent decades. We calculated the bottom shear stress, tidal asymmetry, and residual current, and compared these with another dataset collected during 2009, aiming to quantitatively examine the influence of the reclamations during 2009–2015 on the hydrodynamics and sedimentary processes in this region. The results of the observed data indicated that bottom suspended sediment concentration varied in phase with the velocity and bottom shear stress. Comparison between 2009 and 2015 datasets revealed opposing trends for southern and northern Tianjin Port areas. In the northern area, the tidal asymmetry became stronger and landward sediment flux increased from 20.15 to 24.92 g/(s·m), while in the southern area, the tidal asymmetry became weak and landward sediment flux decreased from 37.75 to 6.37 g/(s·m). The net sediment fluxes were in the landward direction for all monitoring stations, implying that the tidal flat near Tianjin Port will continue to accrete. The decomposition of the sediment flux suggested that tidal pumping was the major contributing factor in the net landward sediment flux. The opposite trends between northern and southern area suggested that the tidal flat accretion rate was likely to be enhanced in the northern area and reduced in the southern area because of the new reclamation.

(本文编辑: 李晓燕)