

南黄海苏北近岸西洋水道水沙输运机制分析

刘运令¹, 汪亚平¹, 吴祥柏², 施晓钟³, 邹欣庆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 210093; 2. 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005; 3. 大丰市港务管理局, 江苏 大丰 224145)

摘要: 基于 2008 年 3 月份在南黄海辐射沙脊群西洋水道内 5 个站位大潮期间的观测数据(包括流速与悬沙质量浓度的垂向剖面), 利用机制分解法计算了西洋水道内的水与悬沙通量。结果表明, 水体在多数时段内均处于分层向混合过渡的状态, 中下层水体的理查德森数(R_i)与瞬时悬沙输运量中的平均流输沙项及流速的潮周期变化相关项之间存在显著的负相关关系, 表明水体的层化效应和混合程度对悬沙输运有重要影响。西洋水道内悬沙净输运率为 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 量级, 并以欧拉余流向岸输运为主, 该结果揭示了苏北近岸潮滩在陆源物质供应减少背景下向海快速淤长的重要物质基础和水动力作用机制。

关键词: 悬沙质量浓度; 通量分解; 理查德森数; 西洋水道

中图分类号: P736.212 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2011)11-0120-08

南黄海辐射沙脊群受南黄海旋转潮波系统、东海前进潮波系统及苏北沿岸流影响, 在长江口至废黄河口之间形成了以琼港为中心的 70 多条水下沙脊, 其间分布着西洋、平涂洋、黄沙洋和烂沙洋等诸多潮汐水道^[1-2]。由于常流、湍流以及潮汐本身的非线性现象, 在近岸和河口区域, 水质点经过一个潮周期之后, 并不回到原先的起始位置上^[3], 使得潮流携带的沉积物在水道、沙脊间发生迁移, 不断塑造着辐射沙脊群的地貌形态, 其物质来源及水动力环境因此亦成为学者历来研究的重点^[4]。

在辐射沙脊群海域的水动力研究中, 研究者大多采用数值模拟方法^[4,5-7], 同步实测资料相对较少^[8-9]。而该海域潮沟汊道众多, 潮流受制于外海潮波、沙洲地形及海岸轮廓的影响, 其大小和方向常随潮况不同而发生一定的变化^[10]。为深入了解大潮期间西洋水道的潮流特征、悬沙质输运过程及其对西部潮滩地貌的响应, 本文基于 2008 年 3 月获取的同步观测资料, 利用河口物质通量分解方法(包括瞬时模式、单宽模式和潮周期模式^[11]), 分析了西洋水道的余流、悬沙输运机制及其与水体垂向结构之间的关系。

1 材料和方法

1.1 区域背景

西洋水道是南黄海辐射沙脊群北部最大的潮流

通道, 黄沙洋水道和烂沙洋水道对应为沙脊群南部主要的潮流通道。其中, 西洋水道大致以小阴沙为界分为西洋东通道和西洋西通道, 前者介于亮月沙和小阴沙之间, 后者介于小阴沙、东沙与岸陆之间^[12]。目前西洋水道内冲刷作用仍较强烈, 底床呈现为小型沙波、穹状沙脊和一些侵蚀沟槽相间分布的复杂地貌特征。该水道受海洋动力和沉积物来源的影响, 西洋深槽底质沉积物主要为细砂, 只有极小部分海底被粉砂质砂、砂质粉砂和泥质粉砂等类型沉积物覆盖^[13]。

1.2 数据采集

2008 年 3 月 10 ~ 11 日(大潮)在辐射沙脊群西洋水道内的 A, B, C, D 和 E 五个站位同步进行了全潮水文观测(图 1, 2008 年海堤为现代岸线)。采用直读式流速仪测量水流流速和流向剖面, 包括表层(距水面 0.5 m), 0.2 h, 0.4 h, 0.6 h, 0.8 h 和底层(距底床 0.5 m); 同步在 0.2 h, 0.6 h 和 0.8 h 处采集 3 层水样, 并在室内用 0.45 μm 的滤膜(已称质量)过滤, 然后烘干称取滤膜和悬浮体的总质量、计算水体的悬沙质量浓度。

收稿日期: 2010-05-07; 修回日期: 2011-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(40576040, 40876043)

作者简介: 刘运令(1979-), 男, 山东平邑人, 博士研究生, 从事海洋沉积动力学研究, 电话: 025-83597308, E-mail: liuyunling006@163.com

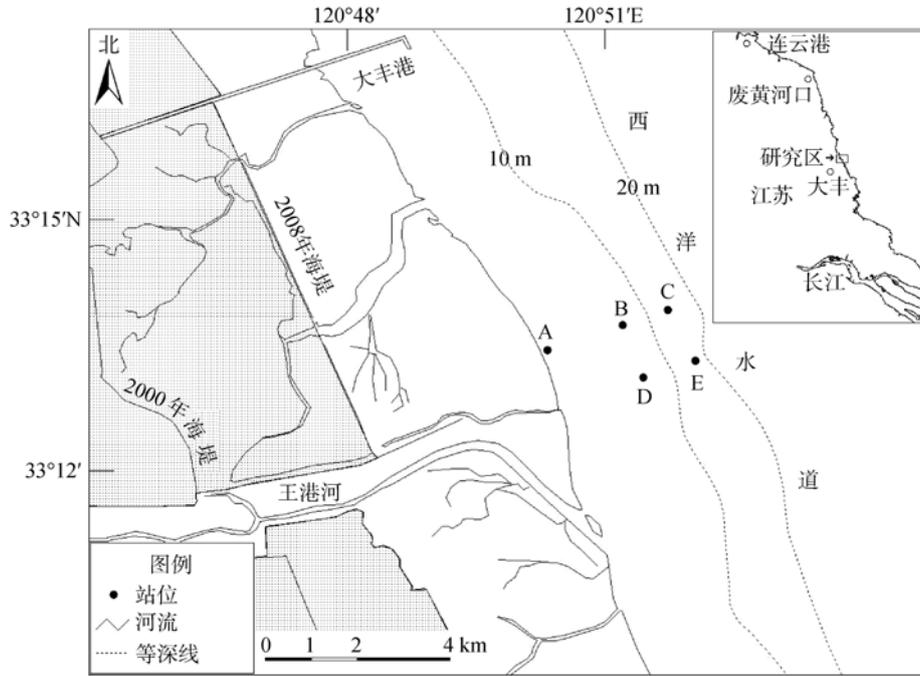


图 1 研究区西洋水道位置图及观测站位

Fig. 1 Map of study area (the Xiyang Channel) showing the anchor stations

1.3 数据分析

将各测站的流速在平面直角坐标系下画出散点图, 确定海流流向的主轴, 然后沿主轴和垂直于主轴的方向进行分解。根据 Dyer 的物质通量计算方法^[11], 流速(u)可分解为垂线偏差项(u_v)、垂线平均的潮平均项(\bar{u}_0)和垂线平均的潮偏差项(\bar{u}_t), 即 $u = u_v + \bar{u}_0 + \bar{u}_t$; 水深(h)可分解为潮平均水深(h_0)和潮偏差值(h_t), 即 $h = h_0 + h_t$ 。同理, 悬沙质量浓度(c)也可分解为 $c = c_v + \bar{c}_0 + \bar{c}_t$ 。

沿水道轴线单宽潮周期平均输水量为:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^1 u h d z d t = \bar{u}_0 \bar{h}_0 + \langle \bar{u}_t \bar{h}_t \rangle = h_0 (\bar{u}_E + \bar{u}_S) = h_0 \bar{u}_L \quad (1)$$

式中: \bar{u}_0 表示潮平均值, 带上划线的量表示垂向平均值, \bar{u}_E , \bar{u}_S , \bar{u}_L 分别为一维垂向平均欧拉、斯托克斯和拉格朗日余流, $\bar{u}_E = \bar{u}_0$, $\bar{u}_S = \langle \bar{u}_t \bar{h}_t \rangle / h_0$ 。

物质单宽潮周期净输运率可以分解为 7 个主要的通量项:

$$\begin{aligned} \langle F \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c d z \\ &= h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0 + \bar{c}_0 \langle h_t \bar{u}_t \rangle + \bar{u}_0 \langle h_t \bar{c}_t \rangle + h_0 \langle \bar{c}_t \bar{u}_t \rangle + \langle h_t \bar{c}_t \bar{u}_t \rangle + \\ &h_0 \langle \bar{c}_v \bar{u}_v \rangle + \langle h_t \bar{c}_v \bar{u}_v \rangle = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 \quad (2) \end{aligned}$$

式中, T_1 表示非潮漂移输运通量, 为欧拉余流

(Eulerian velocity)贡献项; T_2 表示潮汐与潮流相关项, 即斯托克斯漂移(Stokes drift)输运量; $T_1 + T_2$ 为拉格朗日平流输运量; $T_3 + T_4 + T_5$ 为潮泵(Tidal Pumping)效应的贡献量, 它是由潮相位差引起的; T_6 表示河口垂向重力环流贡献项, 它是由近底床向陆的高浓度物质流和表层向海的低浓度物质流共同作用形成的; T_7 表示由潮波变形产生的纵剖面上流速变化和物质浓度变化的相关项; $T_6 + T_7$ 为与剪切扩散相关的输运量。

单宽瞬时输沙率可以表示为:

$$\int_0^1 h u c d z = h \bar{u}_0 \bar{c}_0 + h \bar{u}_0 \bar{c}_t + h \bar{u}_t \bar{c}_0 + h \bar{u}_t \bar{c}_t + h \bar{u}_v \bar{c}_v$$

式中, $h \bar{u}_0 \bar{c}_0$ 为平均流输沙项, $h \bar{u}_0 \bar{c}_t$ 和 $h \bar{u}_t \bar{c}_0$ 分别为流速和悬沙质量浓度潮周期变化输沙项, $h \bar{u}_t \bar{c}_t$ 为潮汐振荡输沙项, $h \bar{u}_v \bar{c}_v$ 为剪切扩散输沙项。

在河口近岸地区, 分层和混合是河口的重要动力属性。由密度梯度导致的分层效应会使流体趋于稳定, 并对流体的混合产生抑制作用; 而流速的剪切作用是导致河口混合的重要机制。这种机制可以用 Richardson 数(R_i)来描述, 它是密度分层强度(N)与流速剪切强度(S)的比值^[14-15]:

$$R_i = \frac{N^2}{S^2} = - \frac{g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \frac{dC}{dz} + \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}{(du/dz)^2}$$

式中, u 为流速, C 为悬沙质量浓度, g 为重力加速度,

z 距离海底的高度, ρ_s , ρ 分别为沉积物密度和海水密度。若 $R_i > 0$ 时, 表明分层是稳定的; $R_i = 0$, 没有分层; $R_i < 0$, 表示分层不稳定。当 R_i 继续增大、层化到一定程度时, 即 $R_i = 0.25$ 时, 水体间的垂向混合交换被抑制, 在海洋中存在非恒定、非均匀流时, 该临界值可能大于 0.25。

2 结果

2.1 流速与悬沙质量浓度的时空分布

水文观测结果表明, 西洋水道各站位潮流具有时间-流速不对称性, 即涨潮流速大于落潮流速并且涨潮历时小于落潮历时(两者相差约 0.5 h)。涨潮流大致沿岸向东南, 落潮流为沿岸向西北, 有较强的往复流特征(图 2)。此外, 各站位还存在潮汐日不等现象, 相邻的高潮位(或低潮位)相差 0.2 m 左右。

A 站在大潮平均低潮线东侧, 测量期间平均水深(自海底至平均海面的距离, 下同)为 4.2 m, 在涨急和落急时潮位变化较大, 垂线平均流速相应出现两个峰值, 其中涨急最大流速为 0.96 m/s。从整个潮周期来看, 悬沙质量浓度与垂线平均流速的关系非常密切, 几乎具有相同的变化趋势。如在涨急时刻, 表、底层悬沙质量浓度分别达 1.14 和 1.45 kg/m³; 垂线平均悬沙质量浓度在落急时刻达 1.27 kg/m³。B 站介于 A 站东侧, 测量期间的平均水深为 13.3 m, 垂线平均流速也在涨急和落急时刻达到最大值, 分别为 1.69 m/s 和 1.22 m/s。潮周期内垂线平均悬沙质量浓度为 0.62 ~ 1.07 kg/m³, 某些时刻其垂向梯度较大, 如涨急时表层为 0.36 kg/m³、底层为 1.28 kg/m³。C 站位于西洋水道内, 离岸相对较远, 平均水深为 15.8 m, 垂线平均流速在涨急和落急时刻的最大值分别为 1.71, 1.35 m/s, 较近岸的 A, B 两站明显偏大, 这主要与该站水深较大、受海岸和海底的摩擦效应较小有关。该站的垂线平均悬沙质量浓度为 0.57 ~ 1.09 kg/m³, 略小于 A, B 两站。D 站、E 站分别位于 B 站、C 站以南, 分别与 B 站、C 站具有类似的水动力与悬沙特征。

2.2 通量分解

2.2.1 余流

各站位的潮周期水通量计算结果如表 1 所示。近岸站位(A, B 和 D 站)的欧拉余流主要为沿岸向东南运输, 离岸站位(C 和 E 站)则以向岸运输分量较大。如 A 站的欧拉余流沿岸分量约为向岸分量的

1 倍, 而 C 站沿岸分量尚不及其向岸方向分量的 1/2。研究区北侧站位(A, B 和 C 站)的拉格朗日余流都是 SSW 向; 南侧近岸 D 站的拉格朗日余流为 SSE 向,

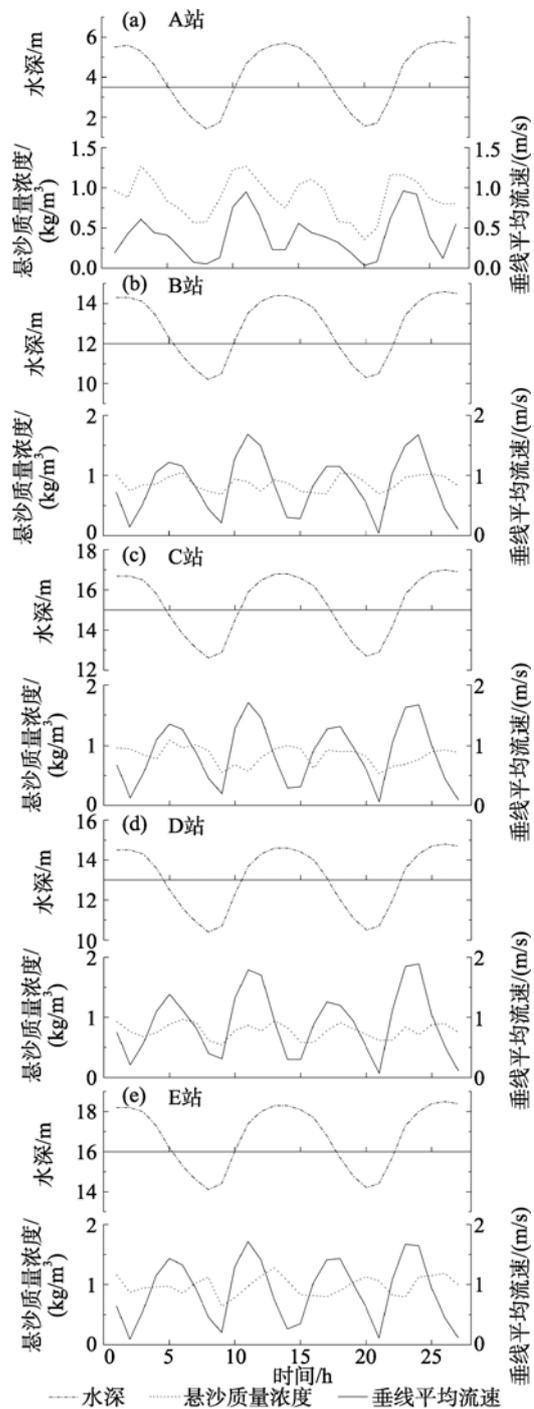


图 2 2008 年 3 月 10~11 日西洋水道大潮期间观测站位的水深、悬沙质量浓度和垂线平均流速

Fig. 2 Water levels, suspended sediment concentrations and depth-averaged current velocities measured at anchor stations in the Xiyang Channel during March 10~11, 2008

离岸的 E 站则转变为 SWW 向。其中, 中间站位 B, D 的沿岸拉格朗日余流最大, 分别达 0.098 和 0.143 m/s。相对而言, 斯托克斯余流的量值比欧拉余流和拉格朗日余流都要小, 除 A 站外, 主要为沿岸向东南的涨潮流方向输运。

单宽净输水量是非潮汐运动的平均流和斯托克

斯漂移效应共同作用的结果。西洋水道内单宽输水量以 A 站最小、D 站最大, 分别为 0.126 m³/s 和 1.935 m³/s, 都为南偏西向岸方向输送, 该结果与已有研究基本一致^[10]。除 E 站外, 其他站位均以沿岸向东南的净输水分量为主。此外, 所有站位均有一个向岸的较小净输水分量, 量级处于 10⁻² ~ 10⁻¹ m³/s 范围。

表 1 西洋水道观测站位潮周期水通量的分解

Tab. 1 Residual Current-induced water transport flux during a tidal cycle over the anchor stations in the Xiyang Channel

站位	主轴方向(°)	\bar{u}_E (m/s)	\bar{u}_S (m/s)	\bar{u}_L (m/s)	$\bar{u}_E h_0$ (m ³ /s)	$\bar{u}_S h_0$ (m ³ /s)	$\bar{u}_L h_0$ (m ³ /s)
A	72 ~ 252	-0.017	0.002	-0.015	-0.070	0.008	-0.062
	162 ~ 342	0.030	-0.004	0.026	0.126	-0.017	0.110
B	74 ~ 254	-0.031	-0.001	-0.031	-0.407	-0.007	-0.414
	164 ~ 344	0.054	0.044	0.098	0.718	0.588	1.306
C	75 ~ 255	-0.048	0.001	-0.047	-0.765	0.019	-0.747
	165 ~ 345	0.023	0.039	0.062	0.365	0.612	0.977
D	83 ~ 263	-0.014	0.001	-0.014	-0.192	0.008	-0.184
	173 ~ 353	0.097	0.046	0.143	1.311	0.616	1.927
E	71 ~ 251	-0.050	0.001	-0.049	-0.867	0.015	-0.852
	161 ~ 341	-0.019	0.036	0.016	-0.336	0.617	0.281

注: “+”表示沿岸向东南、涨潮方向及离岸方向, “-”表示沿岸向西北、落潮方向及向岸方向(表 2 同)

2.2.2 悬沙通量

大潮期间西洋水道内各站位的潮周期悬沙通量分解结果表明, 近岸站位(A 站、B 站和 D 站)以沿岸向东南、涨潮方向输沙为主, 向岸方向上的输送量较小, 且以欧拉余流输沙最为显著(表 2)。离岸站位(C 站和 E 站)则以向岸输沙为主。由此可见, 悬沙输运明显受余流影响, 但输沙量由离岸站位向近岸站位呈减小趋势。相比之下, 在沿岸方向, 研究区北侧站

位的输沙量小于南侧站位。

在 A 站, 欧拉余流和潮泵效应占主导, 优势流沿岸向东南输沙, 量值分别为 0.116 和 0.169 kg/(m·s); 在向岸方向上, 欧拉余流的输沙率为 0.064 kg/(m·s)。B 站与 D 站相似, 皆以欧拉余流和斯托克斯漂移输沙(即拉格朗日平流输沙)为主, 两者沿岸向东南的输沙率分别为 1.196 和 1.555 kg/(m·s), 比 A 站大一个数量级; 而在向岸方向上, 欧拉余流输沙明显, B 站

表 2 西洋水道观测站位潮周期悬沙通量的分解

Tab. 2 Decomposition of the suspended sediment flux during a tidal cycle over the anchor stations in Xiyang Channel

站位	方向 (°)	T_1 (kg/ (m·s))	T_2 (kg/ (m·s))	T_3 (kg/ (m·s))	T_4 (kg/ (m·s))	T_5 (kg/ (m·s))	T_6 (kg/ (m·s))	T_7 (kg/ (m·s))	总通量 (kg/ (m·s))
A	72	-0.064	0.007	-0.004	-0.010	0.006	-0.001	0.000	-0.065
	162	0.116	-0.016	0.007	0.186	-0.024	-0.003	-0.001	0.266
B	74	-0.373	-0.006	0.000	0.007	-0.002	-0.009	0.001	-0.382
	164	0.658	0.538	0.000	0.091	0.013	0.032	0.009	1.340
C	75	-0.663	0.016	-0.002	0.021	-0.003	-0.007	0.000	-0.637
	165	0.316	0.530	0.001	-1.044	0.069	0.000	0.006	-0.121
D	83	-0.155	0.006	-0.001	0.007	0.000	-0.004	0.000	-0.146
	173	1.058	0.497	0.004	-0.042	0.040	0.069	0.008	1.634
E	71	-0.880	0.016	-0.002	0.009	-0.001	-0.010	0.000	-0.868
	161	-0.340	0.625	-0.001	0.630	0.031	-0.077	0.008	0.875

的输沙率约是 D 站(0.146 kg/(m·s))的 2 倍。在 C, E 站, 沿涨潮流方向以潮泵效应和斯托克斯漂移输沙占主导, 其量值都大于 0.5 kg/(m·s); 其次是欧拉余流作用。在向岸方向上, 两站同样以欧拉余流向岸输沙为主, 输沙量值分别为 0.663 和 0.880 kg/(m·s); 斯托克斯漂移的输沙贡献次之, 为离岸输送。不同的是, C 站的潮泵效应与斯托克斯漂移作用同等重要, 输沙率皆为 0.016 kg/(m·s)。

2.2.3 水体垂向结构与悬沙输运的关系

各层位的 R_i 可反映水体的层化结构和流态特征。结果表明, 81%的 R_i 集中在 $-1 \sim 0$ 之间, 42%的 R_i 小于 -0.25 , 在高、低潮时 R_i 变化相对剧烈, 但各站位间 R_i 变化不尽相同(图 3(a~e))。由此可见, 西洋水道内水体在多数时段内均处于分层向混合过渡状态, 而且越往水道内部混合发生的时间越长、频率越高。如水道边缘的 A 站 R_i 小于 -0.25 的频率在 44%

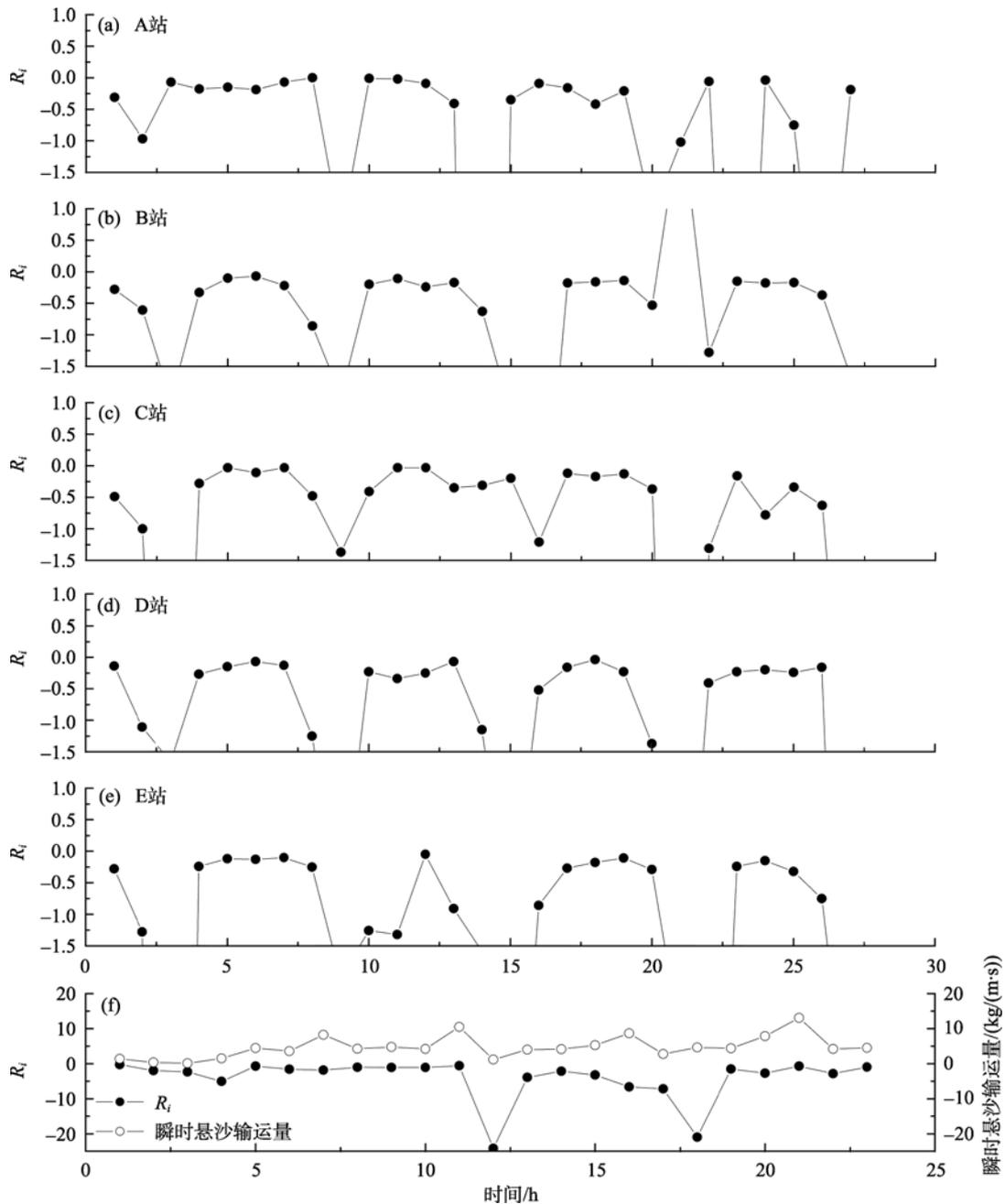


图 3 西洋水道大潮观测期间各站位的 R_i 变化及其与瞬时悬沙输运量的关系

Fig. 3 Variation of Richardson number (R_i) and its relationship with the instantaneous suspended sediment flux during tidal cycles

左右,内部的C站则为63%。此外,对比 R_i 与垂线平均流速及垂线平均悬沙质量浓度的潮周期变化曲线可以发现, R_i 极小值一致出现在流速的加速阶段,而 R_i 极大值往往对应于高悬沙质量浓度值,此现象与长江口的结果类似^[16]。

各站位中下层水体(0.6h以下, h为水深)的 R_i 和瞬时悬沙输运量的关系表明, R_i 与瞬时悬沙输运总量的对应关系并不明显。但当 R_i 极小时,由于水体紊动持续时间较短,加之水体底部沉积物已被充分地再悬浮,海水的悬沙质量浓度未能持续增加至与紊动强度相匹配的量值,所以此时恰好对应于悬沙输

运量的最小值(图3(f))。在瞬时悬沙输运的5个分量项中(若不考虑其方向),以平均流项输沙最为突出,其次是流速的潮周期变化相关项输沙,分别占各站位瞬时悬沙输运总量的38%和36%;其他包括剪切扩散量在内的3个分量项的输沙作用相对较小,仅占悬沙总输运量的26%。由于潮流的非线性效应,分别对各站位中下层水体(同上)的 R_i 与瞬时悬沙输运的5个分量项进行 Boltzmann 曲线拟合发现, R_i 仅与平均流输沙项及流速的潮周期变化输沙项存在着明显的相关关系(图4),而与剪切扩散量项等没有明显相关性,这同时说明 R_i 与潮周期的悬沙输运关系比较复杂。

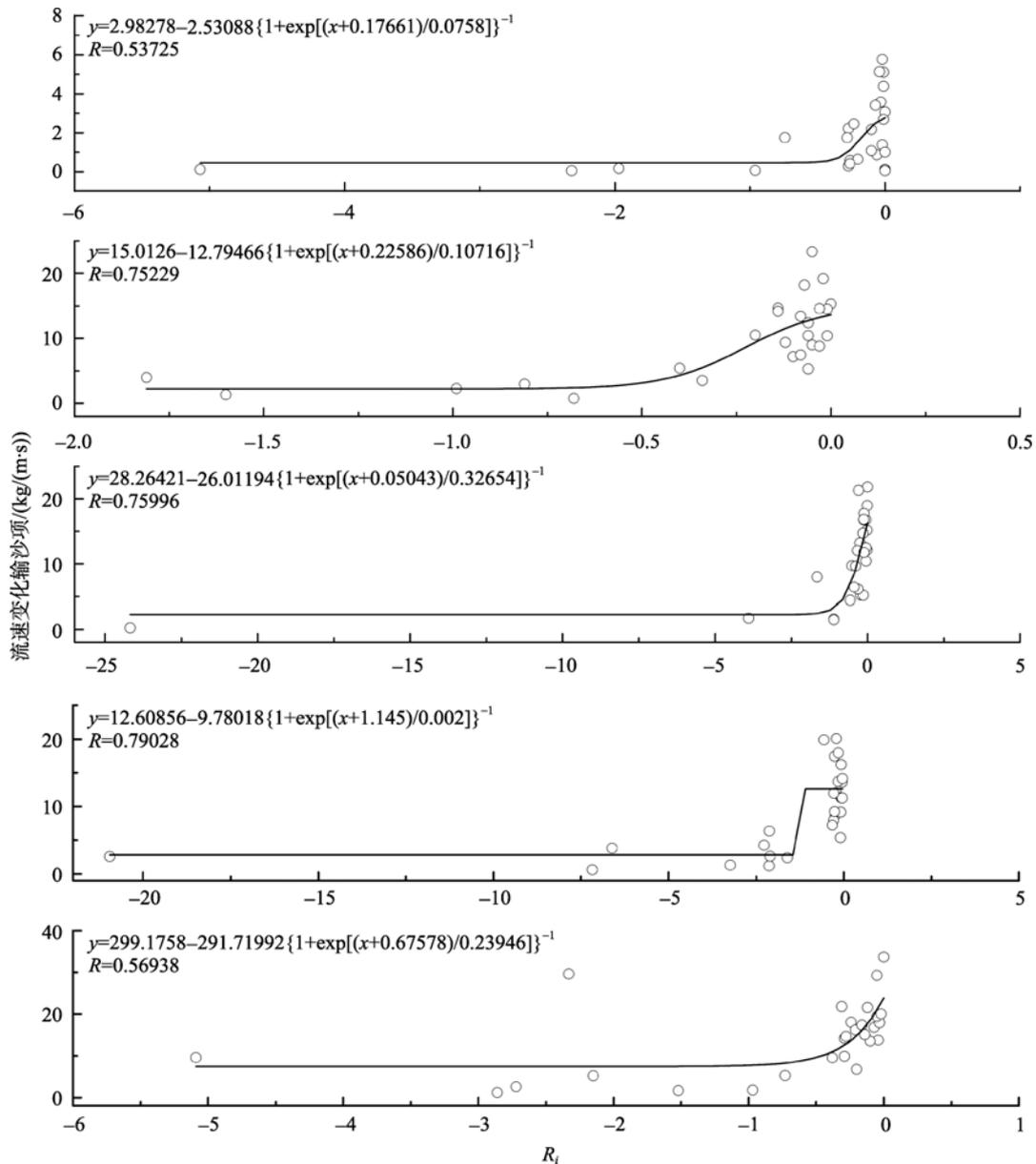


图4 西洋水道各站位距底0.6h以深水体的 R_i 与流速潮周期变化相关项的关系

Fig. 4 Relationship between Richardson number (R_i) and current velocity variations during tidal cycles, in terms of the water depth of 0.6 h in Xiyang Channel

3 讨论

在江苏海岸中,射阳河口至东灶港岸段是淤积作用最强、潮间带浅滩最宽的地带^[1],尤其是位于西洋水道西岸的大丰潮滩增长最快^[17],其潮间带淤积的泥沙主要来自滨外区^[1]。另据调查^[13],西洋水道边缘近岸海域的沉积物为粉砂或粉砂质砂,全潮单宽推移质输运率一般为 10^{-3} kg/(m·s),并且沉积物大多沿岸向东南输运。本文研究表明,大潮期间西洋水道向岸的潮流单宽悬沙输运率一般为 10^{-1} kg/(m·s)。可见,该海域内向岸的推移质输运量明显小于其悬沙输运量。前人的研究结果也发现,沉积物从射阳河口岸外向大丰潮滩净输运^[17]。

正是由于西洋水道内沉积物的向岸净输运作用,促使该海域西部潮滩在陆源物质供应大量减少背景下仍能持续向海淤长,西洋水道亦一直离岸向东缓慢移动^[18]。而在潮流向岸供沙的诸多动力因子中,欧拉余流几乎完全控制着悬沙的输运,垂向重力环流的贡献与其相差一个数量级之多。此外值得注意的是,水道内潮流的单宽输沙率由海向岸呈递减趋势。这说明西部的潮间带和潮下带都存在泥沙淤积,并且在以海域来沙为主的情况下潮下带的淤积量要偏大。数学模型模拟的结果表明,在供沙充足的天然情况下,潮滩将会保持一定坡度、以均衡态剖面形态向海淤长^[19-20]。若按照上文中 10^{-1} kg/(m·s)的输沙率估算,BD断面大潮期间向岸的年平均输沙量约为 4.18×10^9 kg,与2008年5~12月的实测结果(半年间平均淤积厚度约0.5 m)基本一致^[13]。因此,潮下带欧拉余流的向岸输沙是造成该区域潮滩持续淤涨的重要因素。

4 结论

在西洋水道近岸海域,潮流以沿岸向东南的涨潮流占优势,属于典型的往复流。悬沙质量浓度有显著的时空变化,水道内研究区北侧的悬沙质量浓度由岸向海呈减小趋势,南侧反向呈增加趋势。

西洋水道潮周期余流通量机制的分析表明,近岸区欧拉余流都为SSW向,且以沿岸向东南、涨潮流方向分量较大;离岸区欧拉余流则以向岸输运占主导。拉格朗日余流数值与欧拉余流相近。斯托克斯余流较小,大多沿岸向东南输运。

西洋水道研究区内的悬沙净输运率北侧较小、南侧较大,近岸区大于离岸区。其中,欧拉余流是潮

流由海向岸输沙的重要动力因子。西洋水道内 R_i 多为负值,水体在多数时段内均处于分层向混合过渡状态。此外, R_i 与瞬时悬沙输运总量并无明显对应关系,仅是与其平均流输沙项及流速的潮周期变化相关项存在显著的负相关关系,但不同时段内的瞬时悬沙输运量最小值往往对应着 R_i 的极小值。

参考文献:

- [1] 任美镔. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 19-517.
- [2] 任美镔, 张忍顺, 杨巨海, 等. 风暴潮对淤泥质海岸的影响——以江苏省淤泥质海岸为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 1-24.
- [3] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 250-251.
- [4] 诸裕良, 严以新, 薛鸿超. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——I. 潮流运动平面特征[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(5): 403-410.
- [5] 宋志尧, 严以新, 薛鸿超, 等. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——II. 潮流运动立面特征[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(5): 411-417.
- [6] 张东生, 张君伦, 张长宽, 等. 潮流塑造—风暴破坏—潮流恢复(试释黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制)[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(5): 394-402.
- [7] 朱玉荣, 常瑞芳. 南黄海辐射沙洲区悬沙潮扩散规律数值研究[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(4): 615-621.
- [8] 吴德安, 张忍顺, 严以新, 等. 江苏辐射沙洲潮流水道挟沙力的分析与构建[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007, 22(3): 371-379.
- [9] 吴德安, 张忍顺, 严以新, 等. 辐射沙洲东大港潮流水道悬沙输移机制分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 216-222.
- [10] 吴德安, 张忍顺, 沈永明. 江苏辐射沙洲水道垂线平均余流的计算与分析[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(4): 289-295.
- [11] Dyer K R. Estuaries—A Physical Introduction (2nd edition)[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 1997: 195.
- [12] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 23-246.
- [13] Wang Ya-ping, Gao Shu, Jia Jian-jun, et al. Sediment

- fluxes over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. *Marine Geology*, 2011. doi:10.1016/j.margeo.2011.01.004.
- [14] Dyer K R. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 1986: 337.
- [15] Friedrichs C T, Wright L D, Hepworth D A, et al. Bottom-boundary-layer processes associated with fine sediment accumulation in coastal seas and bays[J]. *Continental Shelf Research*. 2000, 20: 807-841.
- [16] 吴祥柏, 汪亚平, 潘少明. 长江河口悬沙与盐分输运机制分析[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(4): 8-19.
- [17] 程珺, 高抒, 汪亚平, 等. 苏北近岸海域表层沉积物粒度及其对环境动力的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 7-12.
- [18] 黄海军. 南黄海辐射沙洲主要潮沟的变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 1-8.
- [19] 朱大奎, 高抒. 潮滩地貌与沉积的数学模型[J]. *海洋通报*, 1985, 4(5): 15-21.
- [20] 刘秀娟. 江苏潮滩地貌与沉积体系演化的动力学模拟[D]. 南京: 南京大学, 2007.

Mechanism of water and suspended sediment transport in the Xiyang Channel along the southwestern Yellow Sea coast

LIU Yun-ling¹, WANG Ya-ping¹, WU Xiang-bai², SHI Xiao-zhong³, ZOU Xin-qing¹

(1. Key Laboratory of Coastal and Island Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Fujian 361005, China; 3. Port Authority of Dafeng City, Dafeng 224145, China)

Received: May, 7, 2010

Key words: suspended sediment concentration; flux decomposition; Richardson number; the Xiyang Channel

Abstract: Based on the sediment dynamics measurement of water levels, current velocities, and suspended sediment concentrations at five stations in the Xiyang Channel along the southwestern coast of the Yellow Sea in March 2008, the water and the suspended sediment transport fluxes were calculated by the flux decomposition method. The results show that the water is in the transition from stratification to mixing during tidal cycles according to the Richardson number R_i . Moreover, a significant negative correlation is present between R_i and advection term (and the current velocity variations during tidal cycles). In addition, net transport rate of the suspended sediment is in the magnitude of $10^{-1} \sim 10^0$ kg/(m·s). The suspended sediment transport is dominated by the Eulerian effect, towards the western coast, which plays an important role on the progradation of the adjoining tidal flats.

(本文编辑: 刘珊珊)