

# 废黄河口海域的悬沙输运机制研究\*

郭瑾<sup>1</sup> 邢飞<sup>1</sup> 闫玉茹<sup>2</sup> 李占海<sup>1</sup> 朱庆光<sup>3</sup> 汪亚平<sup>1,4</sup>

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200241; 2. 有色金属华东地质勘查局地球化学勘查与海洋地质调查研究院 江苏南京 210007; 3. Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA; 4. 南京大学地理与海洋科学学院 江苏南京 210023)

**摘要** 废黄河三角洲是南黄海内陆架的重要物源。为深入探索废黄河口海域沉积物输运机制,利用 2015~2016 年夏季与冬季在废黄河口外海域 10 个站位获取的现场沉积动力数据,计算潮不对称参数、余流、悬沙输运量等。分析结果表明,废黄河口海域沉积物输运模式存在显著的空间差异,大部分海域悬沙沿等深线向南输运,仅在近岸侧局部悬沙向岸或向北输运、离岸最远处站位向北输运但输运率较小;近岸浅水海域以平流输沙为主,其他离岸区域以再悬浮作用为主。由于流速和悬沙浓度之间的相位差,导致余流(净水输运)方向与净悬沙输运方向存在差异。研究沉降速度与悬沙输运涨落潮不对称的关系,发现沉降速度越大,悬沙输运的不对称性就越显著;沉降速度是造成近底部流速与悬沙浓度相位差的主要原因,导致废黄河口外净悬沙输运存在显著的垂向差异。

**关键词** 废黄河口; 水下三角洲; 沉积物输运; 平流输运; 再悬浮

**中图分类号** P736.21+1 **doi:** 10.11693/hyhz20211100282

三角洲是重要的河海交汇带。河流所携带的沉积物在海洋动力条件、可容空间、全球气候变化以及人类活动等因素的共同作用下,形成不同形态的三角洲(Wright *et al.*, 1973; Giosan, 2007; Hanebuth *et al.*, 2012; 高抒, 2013), 并为周边海域提供沉积物来源。当三角洲的沉积物供应大幅减少甚至消失的时候,三角洲发生侵蚀,沉积物被海流带走而脱离三角洲系统,岸线后退且水下三角洲经历剧烈的地形变化(Giosan *et al.*, 2006)。

废黄河三角洲是典型的废弃三角洲。公元1128~1855年,黄河在江苏北部入海并形成三角洲;1855年后,黄河改道入渤海,该三角洲失去物源供给,海浪和潮流导致废黄河三角洲发生剧烈侵蚀(张忍顺, 1984; 虞志英等, 2002), 被称为苏北废黄河三角洲;1855~1987年,废黄河三角洲区域海岸线被侵蚀后退约20 km(王艳红, 2006)。废黄河三角洲体系在黄、东海的海洋沉积中有着重要作用,是济州岛以南区域

海底沉积物的重要物源(Yang *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2020); 废黄河三角洲的沉积物可通过沿岸海流输送至长江水下三角洲的前缘及前三三角洲区域(Liu *et al.*, 2010; Xing *et al.*, 2012)。因此,废黄河三角洲是黄海、东海区域的海洋沉积、物质通量以及水体物理环境研究的重要区域。沉积物输运受各种水动力因素及沉积物特性的影响,包括粒径大小、流速、底部切应力等(杜家笔等, 2012; 陈丹茜等, 2019), 海岸工程的建设导致岸线变化(Sun *et al.*, 2021), 进而也对近海地区的水动力和沉积物输运产生重大影响(刘强等, 2017)。废黄河水下三角洲沉积物受到上述各种动力因素和海岸工程的影响,可通过平流输运与再悬浮等形式被起动、搬运,造成沿海地区悬沙浓度的分布变化以及底床的侵蚀和沉积(Zhang *et al.*, 2016)。

前人对废黄河水下三角洲的研究主要聚焦局部区域沉积物的分布特征、潮周期内悬沙浓度的时空变化以及局部沉积物输运趋势分析等(周良勇等, 2009;

\* 国家自然科学基金杰出青年基金项目, 41625021 号; 上海市教育委员会科研创新计划项目, 2019-01-07-00-05-E00027 号。郭瑾, 硕士研究生, E-mail: 51193904051@stu.ecnu.edu.cn

通信作者: 汪亚平, 博士, 教授, E-mail: ypwang@nju.edu.cn

收稿日期: 2021-11-20, 收修改稿日期: 2021-12-31

管君阳等, 2011; 陆勤等, 2011; Zhang *et al.*, 2016; 鲁号号等, 2019; 秦亚超等, 2019), 或是利用遥感影像对废黄河口岸线变化的监测来推断沉积物输运量及方向(Sun *et al.*, 2021), 以及应用机制分解方法分析废黄河口北侧局部海域沉积物输运趋势(杨林等, 2018); 关于废黄河口沉积物的输运方向一直是研究关注的重点(Ni *et al.*, 2020)。因此, 本文针对废黄河三角洲外海域大范围的冬、夏季水沙输运进行分析, 主要基于 2015 年 9 月与 2016 年 12 月共 10 个站位的全潮沉积动力观测数据, 聚焦时间、空间、垂向上的悬沙输运机制研究, 从多角度判断沉积物输运方向是否在垂向上存在差异性, 废黄河口从近岸到深水、从夏季到冬季的输运机制是否存在变化。

## 1 研究区概况

废黄河口位于我国江苏省东北部(图 1), 东临黄海, 面积约为 7 800 km<sup>2</sup>, 其中滨海港区防波堤位于

废黄河口北侧, 于 2011 年建成。自 1855 年黄河改道以来, 废黄河三角洲土地总损失为 1 400 km<sup>2</sup>, 被侵蚀的沉积物主要沿岸流向南输运(Wang *et al.*, 1987)。废黄河口海域的表层沉积物类型主要有粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂, 其中分布最广的是粉砂(刘强等, 2018)。废黄河口外有一 M<sub>2</sub> 分潮无潮点(34°30'N, 121°10'E), 其附近海域潮差普遍小于 2 m(Zhang *et al.*, 2016)。废黄河口水下三角洲海流以往复流为主, 主要受到黄海旋转潮波的影响, 呈现不正规半日潮的特征, 涨潮流为东南向, 落潮流为西北向。受东亚季风影响, 废黄河口海域风向随季节变化明显, 冬季盛行偏北风, 夏季盛行偏南风, 平均强风方向为北风, 平均风速 3.5 m/s, 最大风速 29.3 m/s(Zhang *et al.*, 2016); 全年以偏北向浪为主(任美镔等, 1986)。废黄河三角洲海岸线的侵蚀受到波浪和沿岸流的影响(高抒, 1989), 其中 10 m 等深线范围侵蚀冲刷显著(刘强等, 2018)。

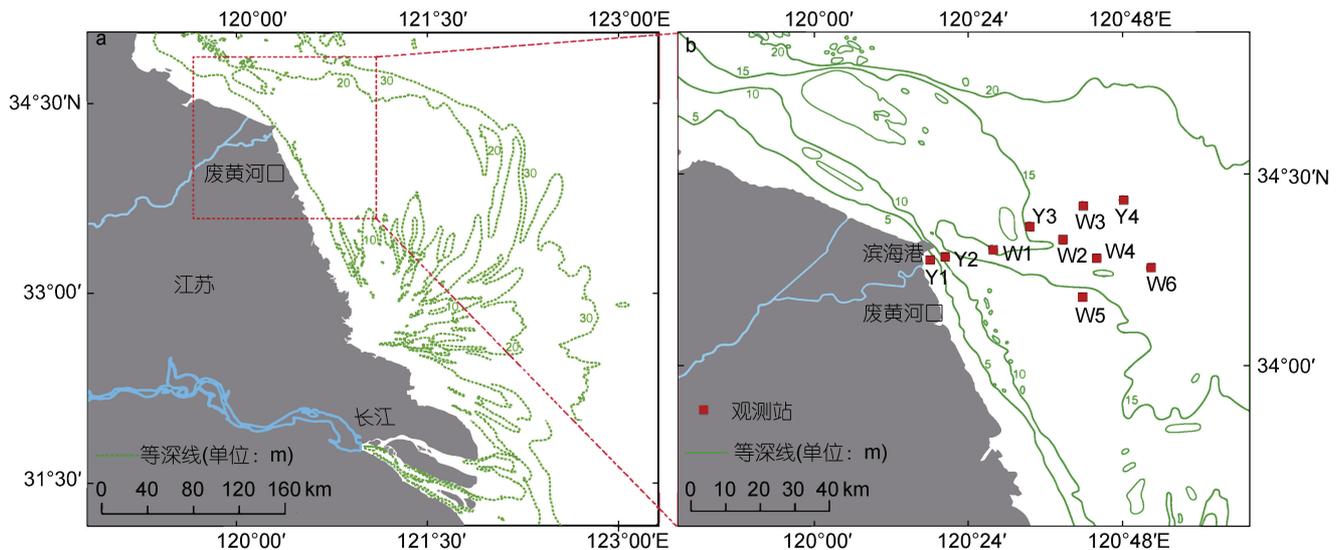


图 1 研究区 (a) 与观测站位图 (b)

Fig. 1 The study area (a) and locations of observation stations (b)

## 2 材料与方方法

### 2.1 数据采集和样品分析

本研究于 2015 年夏季与 2016 年冬季大潮期间在废黄河口外附近海域共布设 10 个站位进行全潮沉积动力学现场观测(图 1), 其中夏季包括从 Y1 (水深 6.5 m) 至 Y4 (水深 19.03 m) 的 4 个站位, 冬季包括 W1 至 W6 的 6 个站位, 覆盖由北向南、由近岸向远岸的

海域, 获取的参数包括水位、流速、流向、浊度等数据, 其中 Y1、Y2 站位观测时间为 2015 年 9 月 15~16 日, Y3、Y4 站位观测时间为 2015 年 9 月 17~18 日, W1 至 W6 站位观测时间为 2016 年 12 月 30~31 日。此 10 个站位均采用锚系观测, 包括船载声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profilers, ADCP)连续获取水层中的流速、流向数据。Y1 至 Y4 站在锚系船只甲板上用光学后向散射浊度计(OBS-3A)每小时

获取浊度剖面,同时采集大量带有悬沙的水样进行室内标定实验;W1至W6采用横式采样器每小时采集六层水样,对应层位分别为0.0 h(水面以下0.5 m)、0.2 h、0.4 h、0.6 h、0.8 h以及1.0 h(距离海底0.5 m),其中h代表该站位瞬时水深。现场采集水样在室内使用孔径0.45 μm的滤膜进行抽滤,然后在40 °C恒温的烘箱中烘干,置于干燥瓶中使其完全干燥,之后采用十万分之一天平称重,最终获得质量悬沙浓度。

## 2.2 数据处理和计算方法

### 2.2.1 流速和悬沙浓度

将ADCP获得的流速数据进行每5 min平均,从而获取平均流速。由于研究区的海流以往复流为主,主流向为潮流椭圆的长轴方向,可计算出涨、落潮流的主流向和次流向(两者相互垂直),然后利用坐标变换得出主流向流速和次流向流速。

对于悬沙浓度,为了将Y1至Y4站位的OBS-3A浊度数据转换为质量悬沙浓度,将现场采集的悬沙同步水样进行OBS-3A标定实验,利用强制归零法将光学后向散射浊度计(OBS-3A)记录的浊度与对应的

质量悬沙浓度建立标定方程(图2),从而将OBS-3A浊度数据转换为悬沙浓度。

### 2.2.2 余流与悬沙通量

根据通量机制分解法(Dyer, 1974),流速 $u$ 可分解成 $u = \bar{u}_t + \bar{u}_0 + u_v$ (单位: m/s)。其中, $\bar{u}_t$ 为垂线平均流速潮偏差项; $\bar{u}_0$ 为潮周期垂线平均流速; $u_v$ 为垂线平均流速偏差项。瞬时水深 $h$ 可以分为潮周期内平均水深 $h_0$ (单位: m)与潮偏差项 $h_t$ (单位: m)之和,则一个潮周期 $T$ 内单宽输水量 $Q$ 为

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

式中, $\bar{u}_L$ 代表垂向平均; $\langle \rangle$ 代表潮周期平均; $\bar{u}_L$ ,  $\bar{u}_E$ ,  $\bar{u}_S$ 分别是一维垂向平均拉格朗日、欧拉和斯托克斯余流(单位: m/s);其中, $\bar{u}_E = \bar{u}_0$ ,  $\bar{u}_S = \langle \bar{u}_t h_t / h_0 \rangle$ ,公式中积分的潮周期 $T$ 采用水位闭合方法确定。将悬沙浓度 $c$ 同样分解为三项, $c = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c_v$ ,其中, $\bar{c}_0$ 为潮周期垂线平均流速; $\bar{u}_t$ 为垂线平均流速潮偏差项; $c_v$ 为垂线平均流速偏差项。因此,潮周期内单宽悬沙输运量( $F$ )为

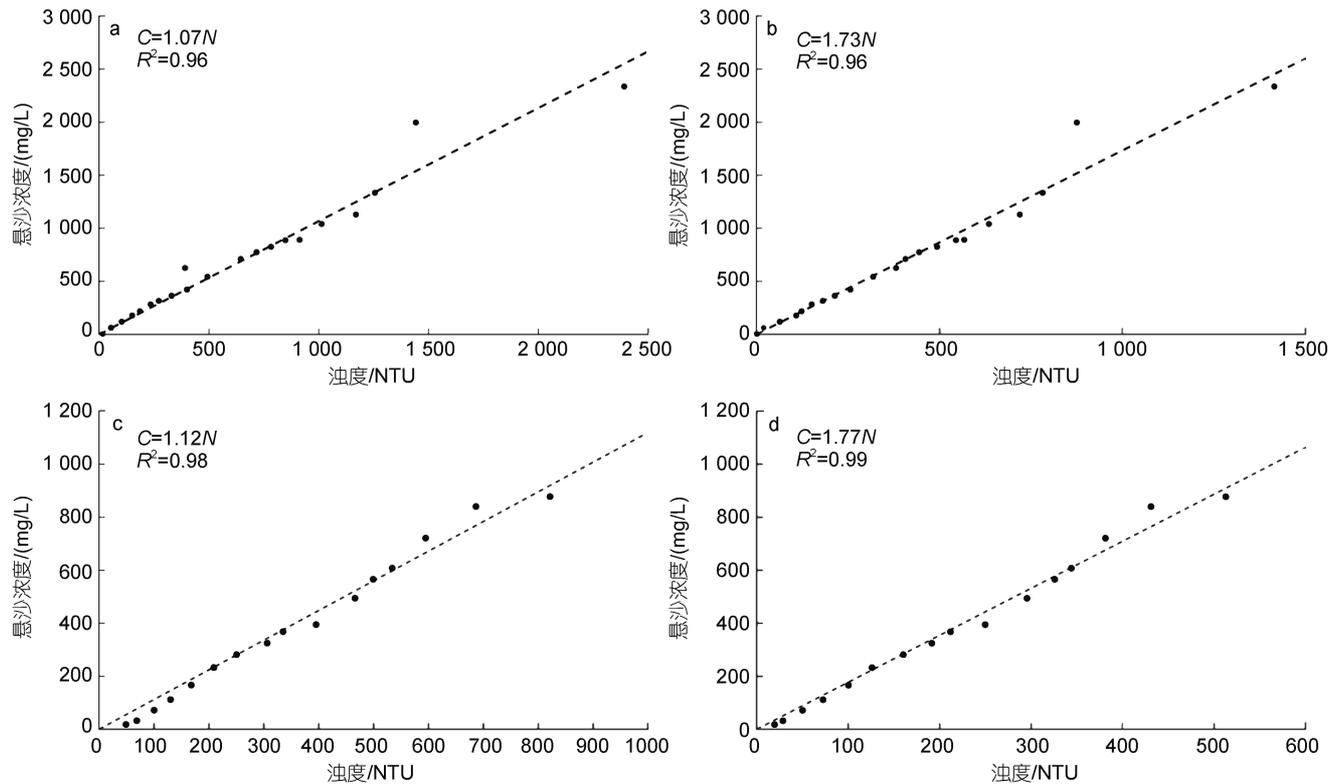


图2 OBS-3A浊度 $N$ (单位: NTU)与悬沙浓度 $C$ (单位: mg/L)的标定曲线图

Fig.2 The calibration curve of turbidities  $N$  (unit: NTU) and suspended sediment concentrations  $C$  (unit: mg/L)

注: a至d为Y1至Y4站位标定曲线

$$\begin{aligned}
 \langle F \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c z d z d t \\
 &= h_0 \overline{u_0 c_0} + \overline{c_0} \langle h_t \overline{u_t} \rangle + \overline{u_0} \langle h_t \overline{c_t} \rangle + h_0 \langle \overline{u_t c_t} \rangle \\
 &\quad + \langle \overline{h_t c_t u_t} \rangle + h_0 \langle \overline{c_v u_v} \rangle + \langle \overline{h_t u_v c_v} \rangle \\
 &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7,
 \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $T_1$  是欧拉余流输沙项, 其方向受欧拉余流控制, 其量值取决于欧拉余流流速和潮周期内的平均含沙量;  $T_2$  项是斯托克斯漂移项, 与潮流相关; 两者合称拉格朗日平流项。 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$  三者与潮流、悬沙和水位变化的相位差有关, 可代表潮泵输运项。 $T_6$ 、 $T_7$  两者与悬沙浓度和流速在垂向上分布的变化有关。将悬沙输运量按照净输运方向与其水平正交方向进行矢量分解, 由于其水平正交方向悬沙输运量较小, 因此, 本文主要考虑净输运方向。将  $T_1$  至  $T_7$  各项在净输运方向上的值除以总净输运量, 可获得  $T_1$  至  $T_7$  各项对净悬沙输运的贡献率。由于在矢量分解中, 净输运方向为正, 其反方向为负, 因此, 这种有正有负的现象可能会导致某一项贡献率超过 100%。

**2.2.3 潮不对称性** 潮波从浅海陆架传播到河口海岸区域后会发生显著变形, 产生涨、落潮历时和水位的潮汐不对称现象(郭文云, 2017), 可采用偏度来进行定量分析(Nidzieko, 2010), 比较常用的是 Song 等(2011)提出的潮汐不对称计算公式:

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

其中,  $\gamma$  为水位时间导数的偏度;  $\eta$  表示水深;  $t$  表示时间;  $\zeta$  为水位的时间导数;  $E$  为期望值;  $\mu_3$  表示流速的三阶原点矩;  $\sigma$  为标准偏差。当偏度  $\gamma < 0$  时, 落潮历时较小, 当偏度  $\gamma > 0$ , 涨潮历时较小。一个潮周期内的悬沙浓度也可以用同样的公式来量化其不对称性。

潮流奇数原点矩可以作为潮流不对称性的定量参数(Nidzieko *et al.*, 2012):

$$\begin{aligned}
 \gamma_0 &= \frac{\mu_3}{\mu_2^{\frac{3}{2}}}, \\
 \mu_m &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N u_i^m,
 \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\mu_3$  表示流速的三阶原点矩;  $\mu_2$  表示流速的二阶原点矩。当  $\gamma_0 > 0$ , 则代表落潮流占主导, 当  $\gamma_0 < 0$ , 则

代表涨潮流占主导,  $\mu_i$  为一个潮周期内主流向垂线平均流速,  $N$  为  $\mu_i$  的个数。悬沙输运也可以用同样的方法进行其不对称性的计算。

**2.2.4 聚类分析** 在对废黄河口外各站位的相关数据进行分析的过程中, 依据单因素数据难以全面描述总体特征。聚类分析是对多个研究对象的多种特性进行综合分析以及分类, 其多个研究对象按照各自特性的相似程度聚合在一起, 相似度最大的优先聚合, 根据聚合类别完成聚类分析(高惠璇, 2005)。根据上文获得的废黄河口外多站位数据, 采用离差平方和法(Ward 法)进行 Q 型系统聚类分析。Ward 法的基本思想是先将这 10 个站位各自作为一个类别, 此时离差平方和  $W$  为 0; 之后每次将两个站位合并为一个类别, 离差平方和  $W$  将增加, 将  $W$  增加最小的两个类别进行合并。离差平方和法(Ward 法)把某两个类别合并后所增加的离差平方和称为类间距离:

$$D_{pq}^2 = W_r - (W_p + W_q), \quad (5)$$

其中,  $D_{pq}^2$  为聚类分析的类间距离;  $W_r$ ,  $W_p$ ,  $W_q$  分别为第  $r$ ,  $p$ ,  $q$  类样品的离差平方和。

### 3 结果

#### 3.1 流速和悬沙浓度

流速矢量显示研究区的海流为往复流, 主流向为东南-西北方向, 且夏季与冬季没有明显的流向差异(图 3)。结合表 1, 可以发现, Y1, Y2, W1, W2 的最大瞬时流速均在涨潮, 其余站位的最大瞬时流速均在落潮。

与主流向流速相比, 废黄河口外各站位的次流向流速相对较小, 通常小于 0.1 m/s, 故在后面的讨论中将其忽略。主流向流速剖面显示 Y1 站位在最高和最低水位流速最低, Y4, W3, W6 等离岸站位流速最大值出现在水位最高与最低处, 其余站位的流速最低时刻出现在最高或最低水位之后 1~2 h(图 4)。总体来说, 各站位涨、落潮流速最大值出现在表层, 但 Y1 站位在落潮时刻流速最大值出现在次表层, 可能与当时风速较大有关; 根据欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的风速数据, 9月16日零点到六点, Y1 站位为东北风, 风速为 5~5.5 m/s, 与落潮流方向相反, 减弱了表层流速, 导致最大流速出现在次表层; 其余站位观测期间, 风速 1.5~2 m/s, 对流速的影响较小。

夏季悬沙浓度最大值出现在 Y1 站位的涨急时刻, 高达 5 000 mg/L, 冬季悬沙浓度最大值出现在 W6 站位的涨潮时刻, 达到 7 800 mg/L(图 5)。从空间分

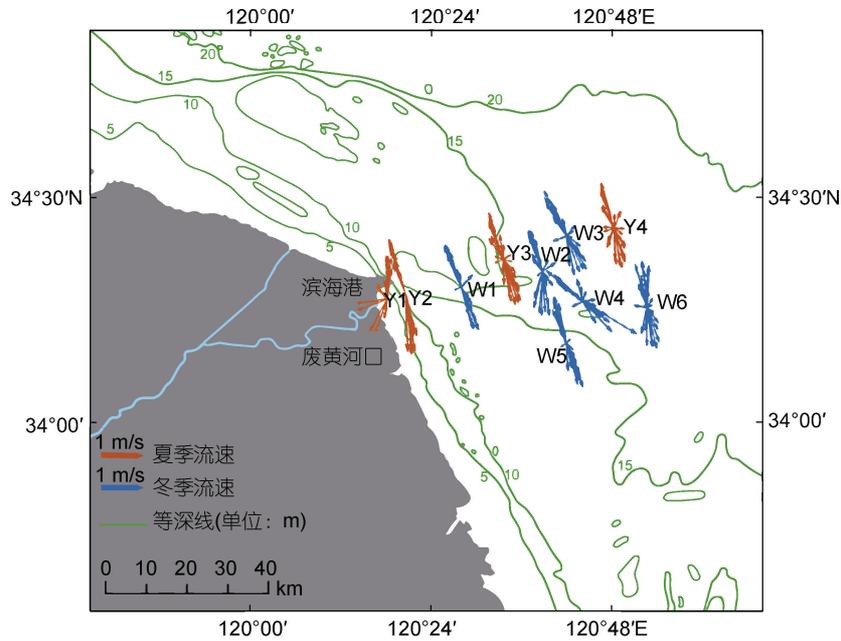


图3 废黄河口外站位流速矢量图

Fig.3 The vector plots of depth-averaged flow for each station of the abandoned Huanghe (Yellow) River delta in summer and winter

表1 废黄河口外观测站位海流特征值

Tab.1 Characteristics of the current in monitoring stations on the abandoned Huanghe River delta

站位	平均水深 /m	主流向/(°)		最大瞬时流速 /((m/s)		垂向平均最大流速/(m/s)	
		涨潮	落潮	涨潮	落潮	涨潮	落潮
		Y1	6.50	203	23	1.03	0.96
Y2	16.02	166	346	1.72	1.55	1.33	1.43
Y3	18.49	160	340	1.29	1.30	1.07	1.07
Y4	19.03	163	343	1.01	1.16	0.98	0.87
W1	18.44	158	338	1.42	1.36	1.06	1.07
W2	16.81	169	349	1.37	1.27	1.01	1.01
W3	18.73	151	331	1.04	1.33	0.92	1.16
W4	19.58	127	307	1.13	1.44	0.92	1.22
W5	16.96	161	341	1.24	1.25	1.07	1.09
W6	18.71	171	351	1.12	1.23	1.00	1.09

布上来说, 近岸站位(Y1, Y2, W1)的悬沙浓度普遍高于离岸站位(Y3, Y4, W2, W3, W4, W5, W6), 可能是由于浅水区域潮流与风浪更易影响到海底, 导致底部沉积物易发生再悬浮。在涨、落急时刻水体近底部出现周期性的高悬沙浓度, 此时水体呈现分层现象, 悬沙浓度的垂向梯度变大。夏季 Y1 至 Y4 站位的悬沙浓度高值出现时刻一致, 均在涨、落急时刻, 且涨急时略高; 冬季 W1 至 W6 站位的高悬沙浓度出现时刻与此类似; 总体来说, 各站位憩流期间的悬沙浓度

相对较低, 原因是此时流速较低, 悬沙发生沉降。

### 3.2 余流及悬沙输运

如表 2 所示, 废黄河口外各站位的拉格朗日余流与欧拉余流的大小与方向接近。相对而言, 斯托克斯余流的量值较小, 基本均小于 2 cm/s。Y1 站位的拉格朗日余流最大, 超过 30 cm/s, 沿岸向西北方向输运。Y2, Y4, W2 站位的拉格朗日余流沿西南方向输运, Y3, W1, W5 站位拉格朗日余流沿东南方向输运, W3 拉格朗日余流沿西北方向输运, W4 和 W6 站位拉格朗日余流沿东北方向输运。夏季站位(Y1 至 Y4)拉格朗日余流值随着与岸线距离的增大而减小, 水深越大, 拉格朗日余流值越小, 同时, 从 Y1 到 Y4, 单宽输水率与单宽输沙率逐渐减小; 冬季站位中, W1 与 W2 站位的拉格朗日余流值、单宽输水率与单宽输沙率均较其他站位偏大。夏季与冬季的单宽输沙率整体呈现向南输运为主, 且单宽输水率与单宽输沙率的方向不完全一致。

### 3.3 悬沙输运通量分解

根据表 3 可以发现, 废黄河口外各站位拉格朗日平流项  $T_1+T_2$  和潮泵效应项  $T_3+T_4+T_5$  的贡献最大, 是影响悬沙输运的控制因素; 垂向环流输移项相对影响很小, 而且大部分为负贡献量。其中, Y1, Y2, W1, W4 站位悬沙输运主要由拉格朗日平流输运控制, 其余站位悬沙输运主要由潮泵效应控制, 而且总体呈

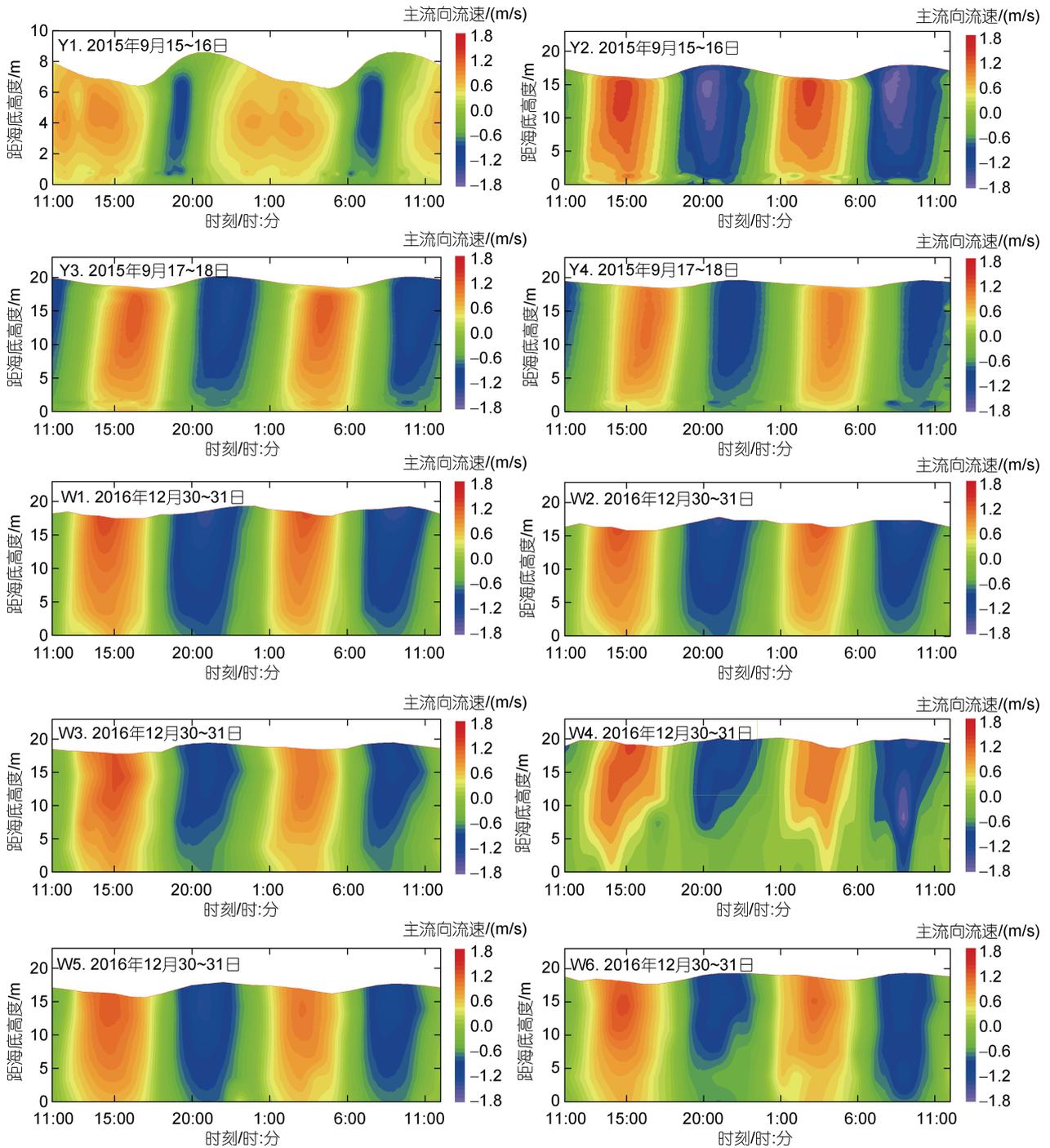
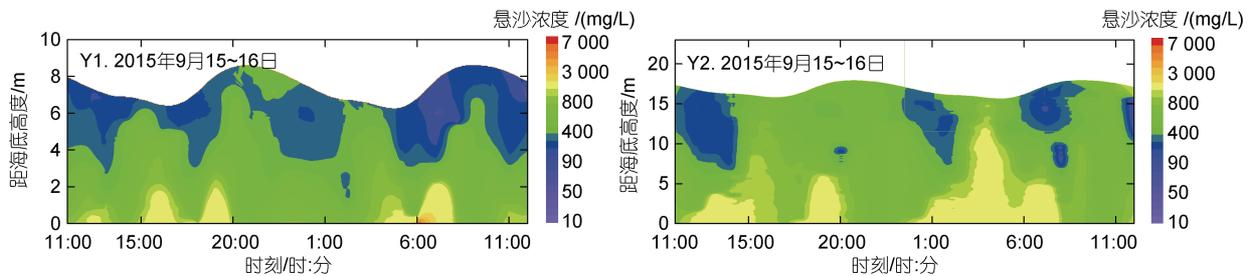


图 4 废黄河口外各站点的主流向流速剖面图

Fig.4 Vertical profiles of velocity along the major-axis at different stations on the abandoned Huanghe River delta



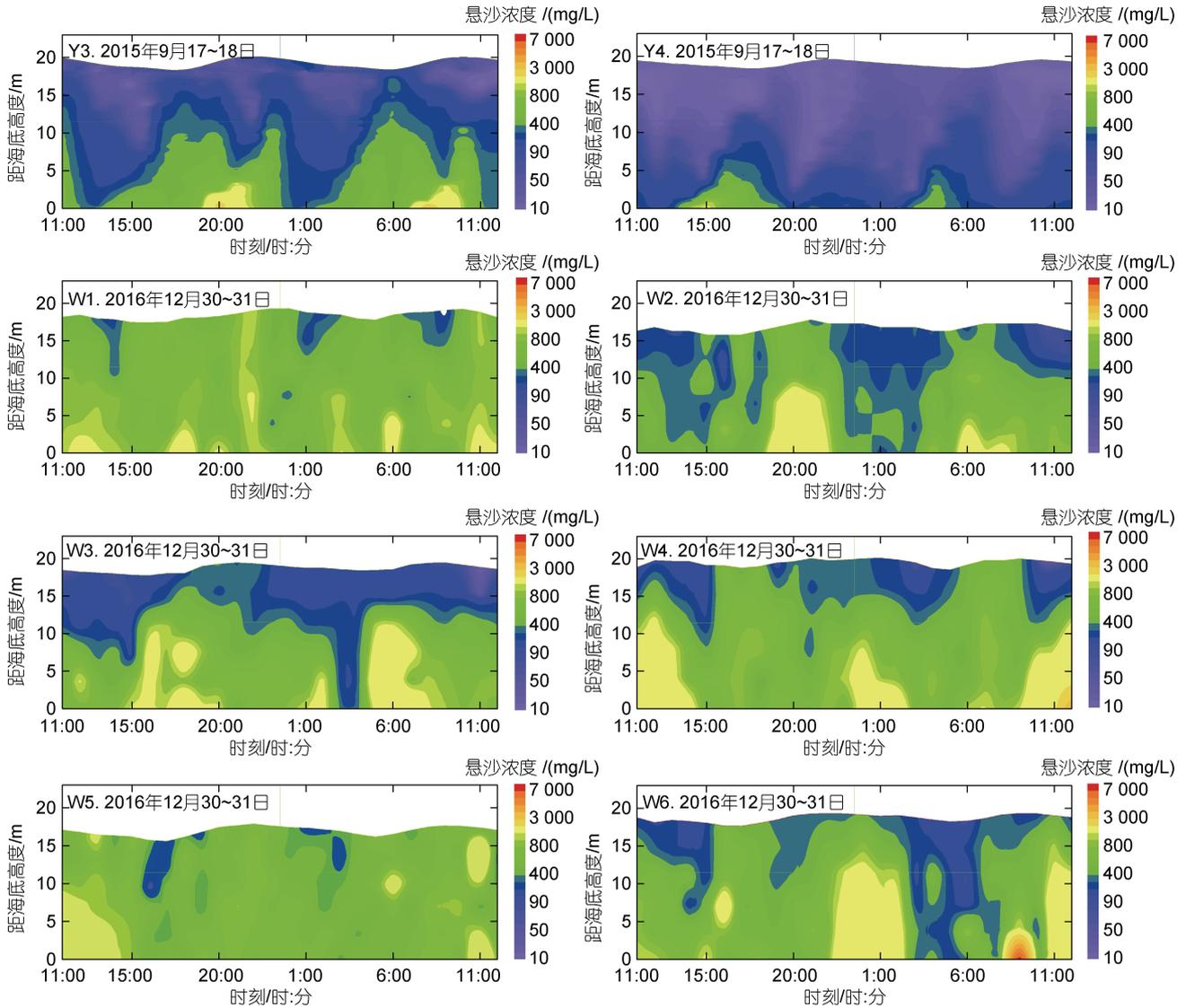


图 5 废黄河口外各站点悬沙浓度剖面图

Fig.5 Vertical profiles of suspended sediment concentrations at different stations on the abandoned Huanghe River delta

表 2 废黄河口外站点余流、单宽输水率及单宽悬沙输运率

Tab.2 Residual currents, water fluxes, and sediment fluxes in the monitoring stations

站点	平均水深 /m	拉格朗日余流		欧拉余流		斯托克斯余流		单宽输水率		单宽悬沙输运率	
		流速/(cm/s)	方向/(°)	流速/(cm/s)	方向/(°)	流速/(cm/s)	方向/(°)	输水率 /(m <sup>3</sup> /s)	方向/(°)	输运率 /(kg/s)	方向/(°)
Y1	6.50	37.15	341	37.52	342	1.19	233	2.55	342	1.38	340
Y2	16.02	9.04	231	8.51	242	1.79	164	1.77	217	1.05	262
Y3	18.49	3.17	144	1.12	122	2.17	155	1.28	155	0.87	172
Y4	19.03	4.14	245	4.23	261	1.14	158	0.91	213	0.38	326
W1	18.44	5.85	134	4.56	126	1.46	158	1.17	134	1.03	138
W2	16.81	10.81	206	9.45	212	1.71	172	1.88	205	2.15	188
W3	18.73	1.65	331	3.25	329	1.60	148	0.33	318	0.38	210
W4	19.58	2.66	26	3.21	17	0.72	162	0.41	29	0.36	19
W5	16.96	2.62	100	2.30	53	1.98	158	0.49	93	0.71	131
W6	18.71	2.07	75	2.42	44	1.26	165	0.41	63	0.98	138

表3 通量分解后各分解项对净悬沙输运的贡献率(单位: %)  
Tab.3 Contribution of each component to the net sediment fluxes by flux decomposition (unit:%)

站位	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
Y1	111.49	-0.40	-1.02	-6.52	-0.81	-2.96	0.22
Y2	92.65	-2.70	-0.34	12.15	0.06	-1.87	0.04
Y3	32.32	15.95	0.06	64.28	1.43	-12.26	-1.78
Y4	-4.69	-6.43	0.03	134.85	-1.02	-23.83	1.09
W1	62.49	17.29	-0.06	21.44	-0.09	-0.70	-0.37
W2	37.66	6.97	0.20	65.18	0.69	-10.26	-0.45
W3	-35.14	20.05	0.01	109.05	-0.97	8.62	-1.63
W4	83.86	-6.70	0.07	22.35	1.44	-2.07	1.04
W5	9.03	29.63	0.02	64.46	0.41	-3.23	-0.31
W6	-6.11	13.34	-0.03	105.30	0.66	-12.46	-0.69

注:  $T_1$ 是欧拉余流输沙项, 其方向受欧拉余流控制;  $T_2$ 项是斯托克斯漂移项, 与潮流相关; 两者合称拉格朗日平流项;  $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ 三者与潮流、悬沙和水位变化的相位差有关, 可代表潮泵输运项;  $T_6$ 、 $T_7$ 两者与悬沙浓度和流速在垂向上分布的变化有关

现近岸的站位(Y1, Y2, W1)由平流输运控制、离岸的站位(Y3, Y4, W2, W3, W5, W6)由潮泵效应控制的特征。

### 3.4 潮不对称特征

废黄河口外各站位的潮不对称偏度值计算结果(表4)表明, 夏季站位(Y1至Y4)落潮历时整体大于涨潮历时(潮位不对称参数  $\gamma_1 > 0$ ), 而冬季站位(W1至W6)则是涨潮历时整体大于落潮历时(潮位不对称参数  $\gamma_1 < 0$ )。就潮流而言, 除了Y3站位涨潮流较强以外(潮流不对称参数  $\gamma_2 < 0$ ), 其余站位均由落潮流占主导(潮流不对称参数  $\gamma_2 > 0$ )。

应用与潮位不对称参数  $\gamma_1$  和潮流不对称参数  $\gamma_2$  的计算方法, 可利用一个潮周期内的悬沙浓度数据计算得到潮周期悬沙不对称参数  $\gamma_3$ , 其绝对值大小代表一个潮周期内该站位悬沙浓度的不对称强度。结果表明, 一个潮周期内Y1和W3的悬沙不对称性较强(表4)。

利用各个站位一个潮周期内的输沙量可计算出潮周期输沙不对称参数  $\gamma_4$ , 输沙不对称参数大于0, 表示这个站位落潮输沙占主导; 小于0, 则表示涨潮输沙占主导, 其绝对值可以代表一个潮周期内的输沙不对称程度。在所有站位中, 夏季站位(Y1至Y4)除了Y3涨潮流输沙占主导外, 其余站位都以落潮流输沙占主导, 与潮流不对称参数反映的结果对应。冬季站位(W1至W6)除了W3是落潮输沙占主导, 与潮流不对称参数反映的结果相对应以外, 其余站位均以涨潮流输沙占主导, 与潮流不对称参数相反, 而4个站位与悬沙不对称的结果相近(W1至W4), 反映了

悬沙浓度的不对称性对输沙不对称的影响大于潮流不对称的影响。

表4 各测站实测水、沙的潮不对称参数  
Tab.4 Tidal asymmetry in terms of water and sediment transport measured at each station

站位	潮位不对称 ( $\gamma_1$ )	潮流不对称 ( $\gamma_2$ )	悬沙不对称 ( $\gamma_3$ )	输沙不对称 ( $\gamma_4$ )
Y1	-0.04	0.93	0.67	0.40
Y2	0.46	0.40	-0.18	0.24
Y3	0.09	-0.29	-0.06	-0.48
Y4	0.10	1.00	0.05	1.60
W1	-0.01	0.32	-0.09	-0.23
W2	-0.20	1.22	-0.13	-1.34
W3	-0.12	0.52	0.28	0.12
W4	-0.72	1.47	-0.07	-0.17
W5	-0.45	0.41	0.05	-0.08
W6	-0.42	0.84	0.10	-1.11

## 4 讨论

### 4.1 沉降速度、平流与再悬浮效应对沉积物输运的影响

Bass等(2002)基于悬沙的扩散方程开发了一个简化的深度平均沉积物平流扩散模型, 该模型可用于评估悬沙沉降速度、平流输运和局部侵蚀的变化对海底沉积物的影响, 解释悬沙浓度与流速的相位差异。应用此模型的代码(Cahl *et al.*, 2019), 我们使用各站位的垂线平均流速与近底层悬沙浓度数据的时间序列计算了每个站位的悬沙沉降速度、平流和再悬浮等参数, 结果如表5所示。

表 5 根据沉积物平流扩散模型(Bass *et al.*, 2002)计算的各站位沉降、再悬浮与平流等参数

Tab.5 The model results of settling velocity, advection rate, and resuspension rate at each station based upon diffusion equations for suspended sediment

站位	沉降速度 (mm/s)	再悬浮率 (kg/m <sup>3</sup> )	平流率 (kg/m <sup>3</sup> )	相对误差 /%
Y1	0.30	3.20×10 <sup>-7</sup>	6.50×10 <sup>-4</sup>	75
Y2	0.20	8.00×10 <sup>-8</sup>	1.50×10 <sup>-4</sup>	33
Y3	0.32	5.00×10 <sup>-5</sup>	3.50×10 <sup>-3</sup>	48
Y4	0.50	3.20×10 <sup>-7</sup>	2.50×10 <sup>-4</sup>	40
W1	0.50	8.80×10 <sup>-7</sup>	1.50×10 <sup>-4</sup>	47
W2	0.10	8.00×10 <sup>-8</sup>	5.00×10 <sup>-4</sup>	45
W3	0.14	6.00×10 <sup>-8</sup>	6.00×10 <sup>-4</sup>	29
W4	0.20	1.60×10 <sup>-7</sup>	1.00×10 <sup>-3</sup>	25
W5	0.10	8.00×10 <sup>-8</sup>	1.00×10 <sup>-3</sup>	25
W6	0.50	1.04×10 <sup>-6</sup>	9.00×10 <sup>-4</sup>	46

计算结果见图 6, 蓝色实线为模型输出的最优结果, 部分站位(Y3, W3, W4, W5 和 W6)模型输出结果与实测悬沙浓度(灰色实线)较为贴合, 其他站位部分时段欠佳。为了探讨再悬浮参数和平流参数的相对重要性, 图 6 还分别呈现了不考虑再悬浮过程以及平流过程的结果。对于 Y2, W1, W2, W6 站位, 在不考虑平流时模型计算的悬沙浓度与实测悬沙浓度没有较大差异, 但是在剔除再悬浮过程对悬沙的影响之后, 模拟结果与实测结果相差较大, 这表明再悬浮效应在这几个站位的悬沙运输过程中占主导地位; 同理, Y3 站位的平流作用在悬沙运输过程中占主导地位; 其余站位如 Y1, Y4, W3, W4, W5 的再悬浮过程和平流过程的相对重要性不显著。

悬沙沉降速度可通过影响水体中高悬沙浓度的持续时间影响到悬沙运输率。对于沉降速度较大的沉积物来说, 若涨潮流较弱, 落潮流较强, 则造成涨潮时期沉积物在离岸地区沉降堆积, 输运至近岸的沉积物变少, 落潮时期强潮流则可携带近岸沉积物离开这个区域; 若悬沙沉降速度较小, 则滞后的再悬浮事件导致涨落潮流都可以产生沉积物的输入或输出(Cheng *et al.*, 2008)。图 7 展现了各个站位沉降速度与悬沙运输不对称性绝对值的相关关系, 可以发现, 整体呈现出沉降速度越大, 其对应站位的悬沙运输不对称性绝对值也越大的趋势。其中, W1 与 W2 站位是偏离此趋势的, 原因可能是 Bass 模型模拟结果与实测悬沙浓度的相对误差较大(W1 与 W2 的相对误差为 46%, 其余八个站位的相对误差的平均值为 40.2%), 从而导致沉降速度计算结果偏差较大。对于其余站位

所呈现的沉降速度越大悬沙运输不对称性绝对值也越大的趋势, 可能是由于较大的沉降速度会导致涨落潮悬沙运输量的差异, 从而导致悬沙运输不对称性更显著。

#### 4.2 废黄河口悬沙运输机制

计算结果表明, 废黄河口外各站位的净水输运与净悬沙运输的空间变化明显受地形影响(图 8)。Y1 的悬沙运输与滨海港南侧防波导堤垂直, 其净水输运方向与悬沙运输方向均为西北方向, 猜测 Y1 站位水动力与沉积物输运受滨海港南侧防波导堤影响很大(图 1), 此外 Y2 的悬沙运输也与岸线方向垂直向岸, 由此推测, 废黄河口外的近岸区域会逐渐堆积。除了 Y1 与 Y2 站位, Y3、W1、W2、W5、W6 的垂向总净水输运方向基本与岸线平行, 其余站位基本与岸线垂直, 净水输运量值呈现近岸大于离岸的趋势。各站位悬沙基本沿等深线方向向南输运, 仅在离岸较远的 Y4、W4 站位悬沙向北输运。

从图 8a 可以看出, 各站位的净水输运方向和净悬沙运输方向不完全一致。根据悬沙运输通量分解的结果(表 3), 推断出平流输沙为主的站位为 Y1、Y2、W1、W4, 潮泵输沙为主的站位为 Y3、Y4、W2、W3、W5、W6, 对于平流输沙为主的站位, 净水输运方向与净悬沙运输方向基本一致, 而以潮泵输沙为主的站位, 则出现净水输运方向与净悬沙运输方向不一致的现象。

从垂向变化上来看, 废黄河口外各站位的表、中、底层的悬沙运输方向不完全一致, 一些站位(Y3、W3、W4、W5)的悬沙运输方向在垂向上存在显著变化。以站位 Y3 与 Y4 为例, 根据悬沙运输机制分解, Y3 与 Y4 都以潮泵输沙为主, Y3 表层、中层与底层的悬沙运输方向有很明显的差异, 而 Y4 的悬沙运输方向与各层位基本一致(图 9)。通过 Y3 与 Y4 底层流速与悬沙浓度的时间序列可以看出, Y3 流速与悬沙浓度的相位差有 3~4 h, 而 Y4 站位流速与悬沙浓度相位基本一致, 主要原因是 Y3 的沉降速度(0.32 mm/s, 表 5)比 Y4 站位(0.5 mm/s, 表 5)显著偏小。沉降速度过小会导致悬沙的滞后效应(Zhu *et al.*, 2019), 从而导致流速与悬沙浓度相位差增大。当流速与悬沙浓度的相位差较大时, 底层高悬沙浓度出现在涨、落憩时刻; 加之悬沙浓度以及流向的突变, 悬沙运输方向的变化更复杂, 因此, 造成垂向上输沙方向的差异。我们根据模型(Bass *et al.*, 2002)模拟出各站位的沉降速度(表 5), 结果显示废黄河口外各站位的表、中、底层

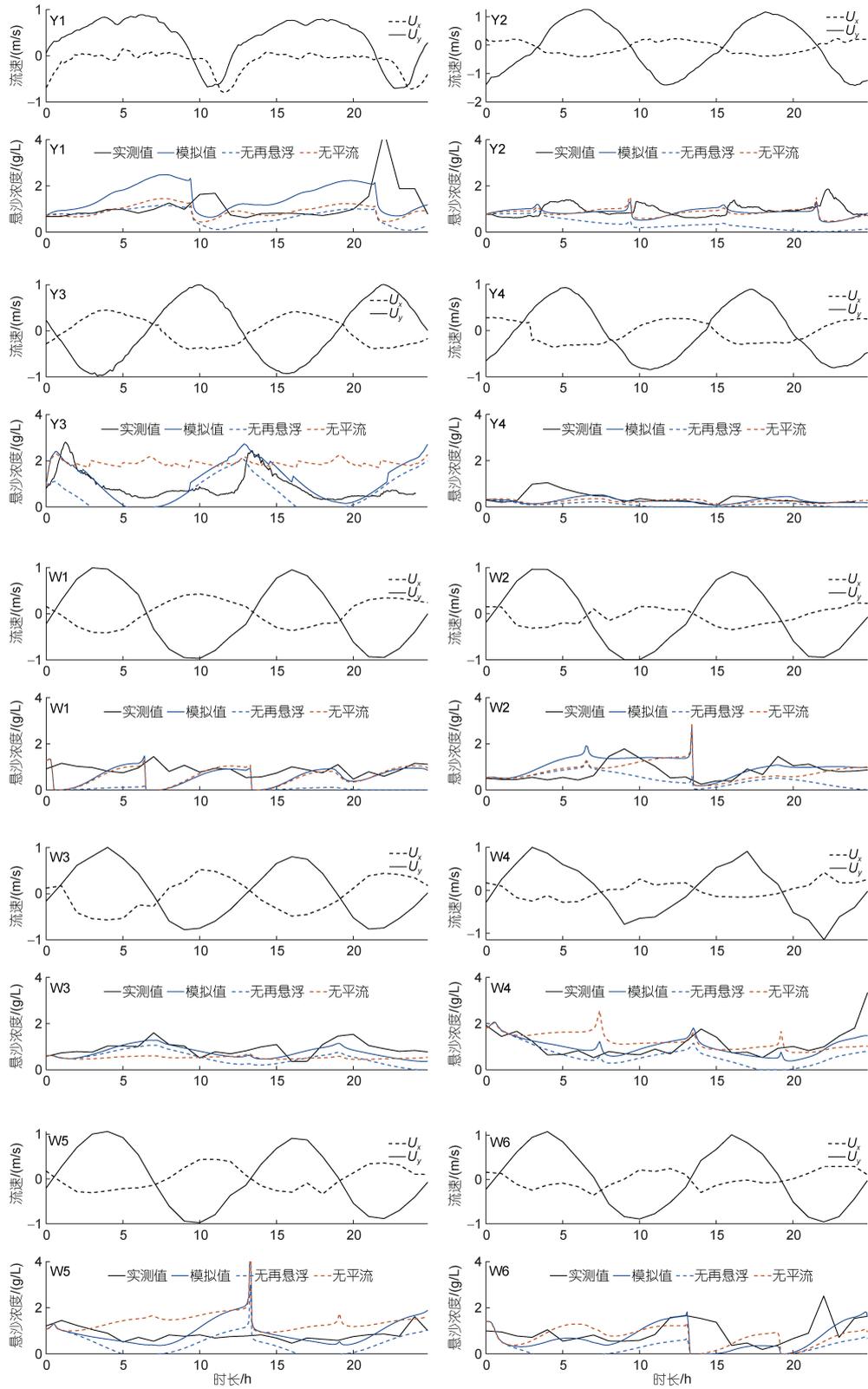


图 6 各站位的垂线平均流速图与简化深度平均沉积物平流扩散模型模拟的悬沙浓度时间序列

Fig.6 Vertical mean flow velocity and time series of suspended sediment concentration based on simple depth-averaged advection-diffusion model at each station

注:  $U_x$ ,  $U_y$  分别为东西方向与南北方向的流速, 其中, 东、北方向流速为正; Y1, Y2 站位的起始时间为 2015 年 9 月 15 日 11:00, Y3, Y4 站位的起始时间为 2015 年 9 月 17 日 11:00, W1 至 W6 站位的起始时间为 2016 年 12 月 30 日 11:00

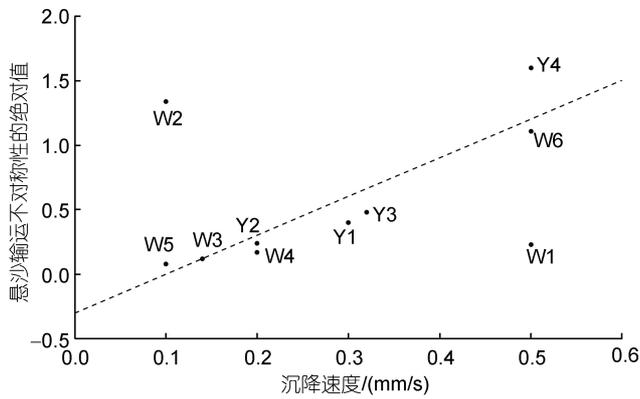


图 7 各站位悬沙运输不对称性的绝对值与沉降速度的相关性

Fig.7 Relationship between sediment settling velocity and absolute value of the asymmetry of suspended sediment transport flux at each station

的悬沙运输方向有差异的站位(Y3、W3、W4、W5)所对应的沉降速度都相对较小, 表明沉降速度对悬

沙运输过程有显著影响。

为了更好地理解废黄河口悬沙运输的空间特征, 本文综合上文计算的离岸距离、潮泵输沙项、平流输沙项、净悬沙运输与净水运输的角度差、沉降速度、悬沙运输不对称的绝对值等参数(表 6), 对各个站位进行聚类分析(图 10), 其中离岸距离是各个站位垂直于岸线的距离。在类间距离为 2.5 时, 十个站位可以分为三类, 第一类是 Y4 与 W6, 离岸距离最远, 悬沙运输模式均以潮泵输沙为主, 沉降速度较大, 悬沙运输不对称性的绝对值较大, 余流与净悬沙运输方向存在差异。第二类是 Y1、Y2 与 W1, 均为离岸距离最近的站位, 悬沙以平流输运为主, 沉降速度与输沙不对称性的绝对值都较小, 净水运输方向和净悬沙运输方向基本一致。第三类是离岸距离位于上面两类之间的站位, 包括 Y3、W2、W3、W4、W5。分析表明, 废黄河口外海域近岸与远岸悬沙运输机制存在显著差异。

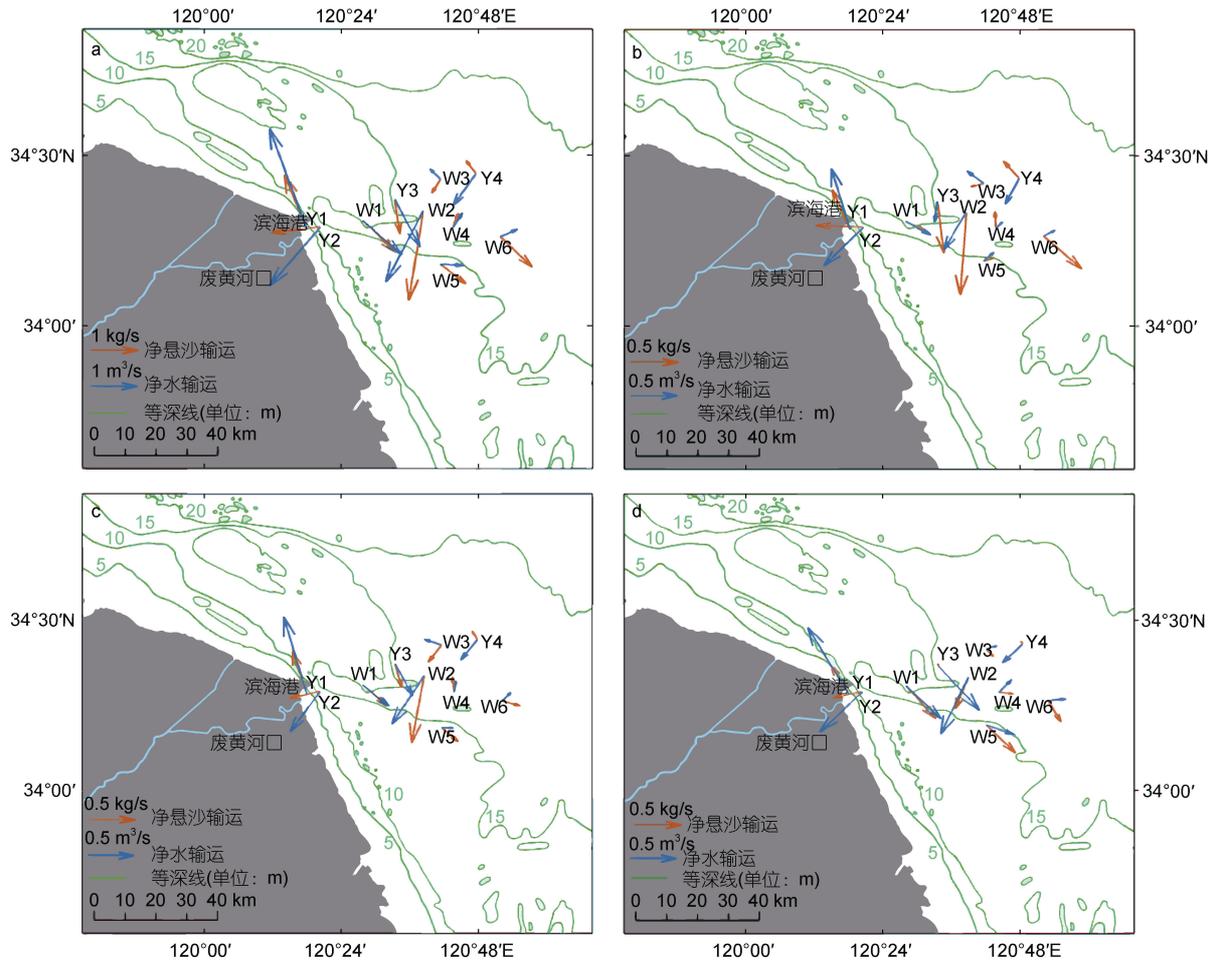


图 8 废黄河口外各站位净悬沙运输与净水运输

Fig.8 Net water fluxes and net sediment fluxes at each monitoring station of the abandoned Huanghe River delta  
注: a 表示垂向积分的总净运输; b, c, d 分别表示表、中、底层净运输

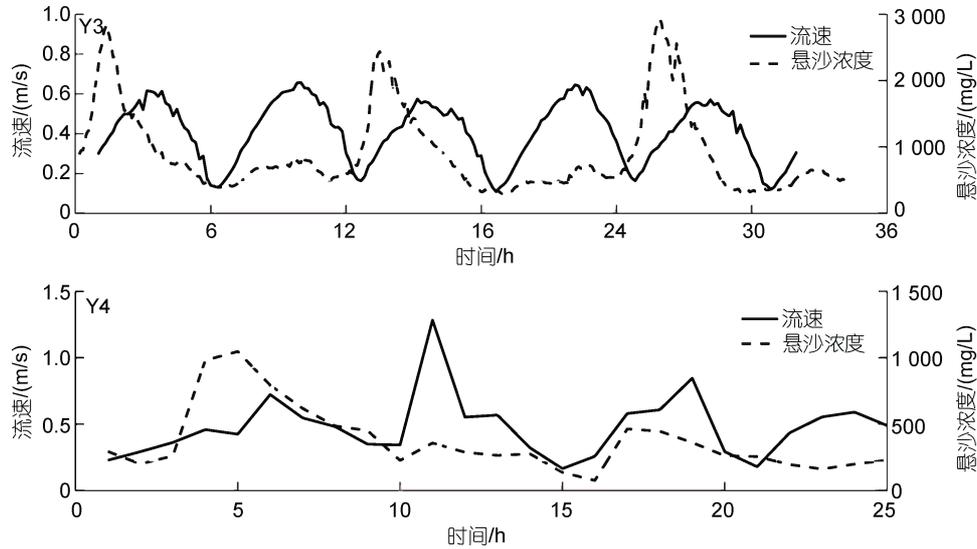


图9 Y3、Y4 站位底部流速与悬沙浓度时间序列图

Fig.9 The time-series of suspended sediment concentration and bottom velocity measured at stations Y3 and Y4

表6 废黄河口外观测站位特征值

Tab.6 Characteristic values at each monitoring stations in the abandoned Huanghe River delta

站位	离岸距离/ km	$T_1$ 贡献率/ %	$T_4$ 贡献率/ %	净悬沙运输与净水运输 的角度差/(°)	沉降速度/ (mm/s)	悬沙运输不对称的 绝对值
Y1	2.8	111.49	-6.52	2	0.3	0.4
Y2	6.5	92.65	12.15	45	0.2	0.24
Y3	28.8	32.32	64.28	17	0.32	0.48
Y4	52.8	-4.69	134.85	113	0.5	1.6
W1	18.7	62.49	21.44	4	0.5	0.23
W2	35.5	37.66	65.18	17	0.1	1.34
W3	42.9	-35.14	109.05	108	0.14	0.12
W4	41.2	83.86	22.35	10	0.2	0.17
W5	34.9	9.03	64.46	38	0.1	0.08
W6	53.1	-6.11	105.3	75	0.5	1.11

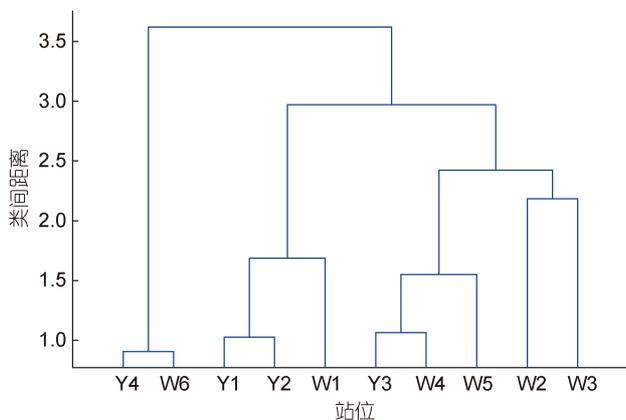


图10 废黄河口外各站位聚类分析谱系图

Fig.10 Dendrogram of hierarchical cluster analysis at each monitoring station of the abandoned Huanghe River delta

### 4.3 废黄河口外悬沙运输与水下三角洲演化的关系

废黄河口的平均强风方向为北风，本文站位观测期间风速基本在 5 m/s 以下，因此风浪事件对观测期间各站位悬沙运输结果影响不大。但根据前人研究显示(朱庆光, 2017)，在废黄河口外有风浪的情况下，悬沙将有很强的东南方向运输，其中，废黄河口南侧的新洋港岸外海域在冬季时期，大风事件会使涨潮流增强，落潮流减弱，此地的海底高悬沙浓度事件的发生主要是由于高浓度的悬沙从废黄河口向南平流运输造成的，冬季的运输量明显高于夏季(郭志刚等, 2002; 郭瑜璇, 2019)。也有数值模拟结果显示(Ni *et al.*, 2020)，涨潮时期，废黄河口沉积物向南输送，落潮时向北输送，但净输送方向偏南。根据本研究的结果，废黄河口外海域部分站位均以再悬浮作用为主，并

且在无风浪的条件下, 夏季站位与冬季站位的悬沙运输方向基本沿岸向南。因此, 我们推测在长时间尺度上, 废黄河口水下三角洲以侵蚀为主, 被侵蚀的沉积物沿岸向南运输, 是南侧潮滩、辐射沙脊的重要物源, 但风浪事件对沉积物运输的贡献暂时还不明确, 未来需加强这方面的研究。本文的观测结果还显示, 虽然废黄河口外悬沙运输沿等深线方向向南运输, 但是离岸远的区域(如 Y4 站)悬沙向北运输, 因此, 废黄河口外海域存在向北(海州湾方向)的运输和向南(苏北辐射沙洲方向)的运输(沈焕庭等, 1986; Xia *et al.*, 2004; Su *et al.*, 2017), 但是由于本研究的观测结果中向北运输的站位信息较少, 具体的泥沙运动格局还要通过进一步的研究来证实。值得关注的是, 在废黄河口近岸区域, 由于人工的滨海港导堤建设等原因, 改变了工程区局部海域的水动力, 沉积物有向人工港湾运动、堆积的趋势; 因此, 目前废黄河口岸线可以在导堤保护下维持现状, 但随着未来极端事件的增多和强度增大, 海岸侵蚀、水下三角洲海底侵蚀状态仍是不容小觑的问题。

## 5 结论

(1) 废黄河口外近岸海域的悬沙向岸运输, 可能与局地人类活动影响、即滨海港导堤工程导致近岸水动力减弱有关; 离岸区域悬沙主要沿等深线向南运输, 仅有一个离岸最远处站位的悬沙向北运输。

(2) 废黄河口外海域的净水运输方向与净悬沙运输方向存在差异, 与不同水深、离岸区域的悬沙运输模式有关, 其中以平流输沙为主的区域(主要是近岸浅水海域), 净水运输方向与净悬沙运输方向基本一致; 以潮泵输沙为主的区域(主要是离岸区域), 其净水运输方向与净悬沙运输方向有较大差别。

(3) 悬沙运输的不对称性主要与悬沙沉降速度的时空差异有关, 沉降速度与悬沙运输不对称参数之间有显著正相关关系, 沉降速度越大、悬沙运输的不对称性就越大。另外, 废黄河口外海域各站位之间沉降速度的差异导致了底层流速与悬沙浓度的相位差, 当底层流速与悬沙浓度的相位差过大, 则会导致净悬沙运输模式的垂向差异。

致谢 唐杰平、陈德志、兰庭飞、盛辉等参加航次调查、采集沉积物和海水样品、浊度计标定, 盛辉、汤碧璇、李任之等协助进行数据分析, 在此一并致谢。此外, 感谢 Cahil D 与 Voulgaris G 提供了深度平均沉积物平流扩散模型的计算代码(doi: 10.5281/zenodo.3363922)。

## 参 考 文 献

- 王艳红, 2006. 废黄河三角洲海岸侵蚀过程中的变异特征及整体防护研究[D]. 南京: 南京师范大学: 9-10.
- 朱庆光, 2017. 潮汐、风和波浪驱动下的废黄河口外海域悬沙运输过程[D]. 南京: 南京大学: 55-60.
- 任美镔, 丁方叔, 万延森, 1986. 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.
- 刘强, 闫玉茹, 项立辉, 等, 2017. 盐城滨海港区防波堤建设对水下地形的影响研究[J]. 海洋科学, 41(3): 80-88.
- 刘强, 项立辉, 张刚, 等, 2018. 苏北废黄河口表层沉积物分布特征及其控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 38(1): 118-126.
- 杜家笔, 裴艳东, 高建华, 等, 2012. 弱动力浅海中的悬沙运输机制: 以天津港附近海域为例[J]. 海洋学报, 34(1): 136-144.
- 杨林, 杨红, 吉新磊, 等, 2018. 废黄河口海域悬沙运输特征[J]. 海洋湖沼通报(6): 1-8.
- 沈焕庭, 李九发, 朱慧芳, 等, 1986. 长江河口悬沙输移特性[J]. 泥沙研究(1): 1-13.
- 张忍顺, 1984. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. 地理学报(2): 173-184.
- 陆勤, 陈沈良, 2011. 废黄河三角洲海域表层沉积物分布特征[J]. 上海国土资源, 32(1): 14-19.
- 陈丹茜, 兰庭飞, 裴艳东, 等, 2019. 天津港水域围垦条件下的水动力变化分析[J]. 海洋科学, 43(10): 113-125.
- 周良勇, 陈斌, 刘健, 等, 2009. 江苏废黄河口外夏季悬沙运动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(6): 17-24.
- 秦亚超, 顾兆峰, 2019. 连云港海域废黄河水下三角洲北翼的沉积特征与空间分布[J]. 海洋学报, 41(11): 101-116.
- 高抒, 1989. 废黄河口海岸侵蚀与对策[J]. 海岸工程(1): 37-42.
- 高抒, 2013. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程——产物关系研究进展评述[J]. 沉积学报, 31(5): 845-855.
- 高惠璇, 2005. 聚类分析[M] // 高惠璇. 应用多元统计分析. 北京: 北京大学出版社出版: 75-76.
- 郭文云, 2017. 潮汐不对称性的时间变化特征及其对工程的响应[D]. 上海: 华东师范大学: 9-10.
- 郭志刚, 杨作升, 张东奇, 等, 2002. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用[J]. 海洋学报, 24(5): 71-80.
- 郭瑜璇, 2019. 渤、黄、东海悬浮物传输过程和机制的数值模拟[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所: 67-68.
- 鲁号号, 杨吻, 唐杰平, 等, 2019. 南黄海废黄河口近岸海域近底部悬沙运输观测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(1): 38-48.
- 虞志英, 张国安, 金镛, 等, 2002. 波流共同作用下废黄河口水下三角洲地形演变预测模式[J]. 海洋与湖沼, 33(6): 583-590.
- 管君阳, 谷国传, 2011. 废黄河口海岸近期侵蚀特征与机理[J]. 海岸工程, 30(2): 50-61.
- BASS S J, ALDRIDGE J N, MCCAVE I N, *et al.*, 2002. Phase relationships between fine sediment suspensions and tidal currents in coastal seas [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C10): 3146, doi: 10.1029/2001JC001269.
- CHENG P, WILSON R E, 2008. Modeling sediment suspensions in an idealized tidal embayment: importance of tidal

- asymmetry and settling lag [J]. *Estuaries and Coasts*, 31(5): 828-842.
- DYER K R, 1974. The salt balance in stratified estuaries [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2(3): 273-281.
- GIOSAN L, 2007. Morphodynamic feedbacks on deltaic coasts: lessons from the wave-dominated Danube delta [C] // Sixth International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Process. New Orleans: ASCE: 828-841.
- GIOSAN L, CONSTANTINESCU S, CLIFT P D, *et al*, 2006. Recent morphodynamics of the Indus delta shore and shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 26(14): 1668-1684.
- HANBUTH T J J, PROSKE U, SAITO Y, *et al*, 2012. Early growth stage of a large delta — Transformation from estuarine-platform to deltaic-progradational conditions (the northeastern Mekong River Delta, Vietnam) [J]. *Sedimentary Geology*, 261/262: 108-119.
- LEE H J, JEON C K, LIM H S, 2020. Dynamical analysis of the mud-belt formation in the Bohai, Yellow and East China seas [J]. *Marine Geology*, 423: 106140.
- LIU J, SAITO Y, KONG X H, *et al*, 2010. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last~13, 000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 29(17/18): 2424-2438.
- NI L, TAO J F, 2020. Wave-induced sediment transport along the abandoned Yellow River delta in Jiangsu coast, China [C] // Proceedings of the 30th International Ocean and Polar Engineering Conference. Shanghai: ISOPE: 2948.
- NIDZIEKO N J, 2010. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C8): C08006.
- NIDZIEKO N J, RALSTON D K, 2012. Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C3): C03001.
- SONG D H, WANG X H, KISS A E, *et al*, 2011. The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12): C12007.
- SU M, YAO P, WANG Z B, *et al*, 2017. Exploratory morphodynamic hindcast of the evolution of the abandoned Yellow River delta, 1578–1855 CE [J]. *Marine Geology*, 383: 99-119.
- SUN Z P, NIU X J, 2021. Variation tendency of coastline under natural and anthropogenic disturbance around the abandoned Yellow River delta in 1984–2019 [J]. *Remote Sensing*, 13(17): 3391.
- WANG Y, AUBREY D G, 1987. The characteristics of the China coastline [J]. *Continental Shelf Research*, 7(4): 329-349.
- WRIGHT L D, COLEMAN J M, 1973. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes [J]. *AAPG Bulletin*, 57(2): 370-398.
- XIA C S, QIAO F L, ZHANG M N, *et al*, 2004. Simulation of double cold cores of the 35°N section in the Yellow Sea with a wave-tide-circulation coupled model [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 22(3): 292-298.
- XING F, WANG Y P, WANG H V, 2012. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 291/294: 192-210.
- YANG S Y, JUNG H S, LIM D I, *et al*, 2003. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 63(1/2): 93-120.
- ZHANG L, CHEN S L, YI L, 2016. The sediment source and transport trends around the abandoned Yellow River delta, China [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 34(5): 440-449.
- ZHU Z C, WANG Y Z, HU Z J, *et al*, 2019. Mechanism of phase lag between current speed and suspended sediment: combined effect of erosion, deposition, and advection [J]. *Journal of Ocean University of China*, 18(1): 43-56.

## THE MECHANISM OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN THE ABANDONED HUANGHE RIVER DELTA

GUO Jin<sup>1</sup>, XING Fei<sup>1</sup>, YAN Yu-Ru<sup>2</sup>, LI Zhan-Hai<sup>1</sup>, ZHU Qing-Guang<sup>3</sup>, WANG Ya-Ping<sup>1,4</sup>

(1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China*; 2. *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210007, China*; 3. *Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA*; 4. *Institute of Geochemical Exploration and Marine Geological Survey, East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210023, China*)

**Abstract** The abandoned Huanghe (Yellow) River delta is an important source of sediment on the inner shelf of the South Yellow Sea. To understand the mechanisms of sediment transport in the coastal ocean of the abandoned Huanghe River subaqueous delta, the tidal asymmetry parameters, residual flows, and suspended sediment transport flux were calculated based on in-situ data obtained in the 10 stations located from nearshore to offshore in summer and winter of 2015~2016. Results show that the suspended sediment transport patterns varied significantly in space. Suspended sediment in most sea areas is transported southward along the isobaths, and only a part of them is transported shoreward or northward on the nearshore side, and in the farthest offshore station is transported northward but the transportation rate is small. The suspended sediment transport in the nearshore shallow water is dominated by advection while that of other offshore areas is dominated by resuspension. The direction of net suspended sediment transport diverges from the direction of residual flow (net water transport) due to that flow velocity and suspended sediment concentration are sometimes out of phase. The relationship between sediment settling velocity and the asymmetry of suspended sediment transport flux shows that the larger the settling velocity, the higher asymmetry degree of suspended sediment transport. The small settling velocity is responsible for the temporal inconsistency between near-bottom velocities and suspended sediment concentrations, resulting in vertical differences in net suspended sediment transport rates in the abandoned Huanghe River delta.

**Key words** abandoned Huanghe River mouth; subaqueous delta; sediment transport; advection transport; resuspension