

# 废黄河口海域潮流动力与悬沙输运特征

陈 斌<sup>1,2,3</sup>, 周良勇<sup>1,3</sup>, 刘 健<sup>1,3</sup>, 王 凯<sup>4</sup>

(1. 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 根据 2006 年度黄河口海域的悬沙、流速、流向的观测资料, 应用短期资料的潮流准调和分析方法, 对连续海流资料进行了分析, 并结合悬沙资料, 对悬沙质量浓度与潮流之间的动力关系进行了探讨。研究表明: 该海域潮流属于正规半日潮流, 潮流以往复流为主, 离岸越远, 旋转性越强; 涨潮流流向以 SSE 为主, 落潮流流向以 NNW 为主。悬沙质量浓度呈现近岸悬沙质量浓度高, 向海逐渐降低的分布形态; 悬沙质量浓度的垂直变化, 从表层到底层由小到大, 近岸悬沙质量浓度垂向梯度较大。悬沙质量浓度出现明显的周期性变化, 悬沙质量浓度的峰值基本与海域半日潮流特点相对应, 悬沙质量浓度的峰值一般出现在流速峰值之后。海域的悬沙在潮流作用下主要向南输运, 与涨落潮的方向基本一致, 涨潮单宽输沙量均大于落潮单宽输沙量。

**关键词:** 废黄河口; 潮流; 悬沙质量浓度; 单宽输沙量

中图分类号: P736.42

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)05-0073-09

苏北近岸海域长期处于波浪、潮流、径流等海洋动力因素共同作用下, 而这些海洋动力因素都有各自不同的运动规律, 相互之间又存在非常复杂的非线性相互作用。波浪不仅影响泥沙运动, 对底部泥沙作用力及水流挟沙能力也都有影响<sup>[1-2]</sup>。潮流运动和波流共同作用下的底部剪切应力对近岸泥沙的悬浮、输运、沉积及海床的演变都起着非常重要的作用; 反过来, 这些变化又影响着水体的运动。因此, 研究影响悬沙输运的控制因素, 充分揭示其运动规律, 不仅可以了解河口及海岸的演变规律, 而且对保护海岸环境, 控制并治理海洋污染有着深刻而重要的意义。

废黄河三角洲是黄河在 1128 年夺淮入海, 历时 7 个多世纪, 巨量泥沙下泄在江苏北部而形成。1855 年黄河改道注入渤海后, 废黄河三角洲进入了一个在海洋动力作用下全面侵蚀改造的过程<sup>[3]</sup>, 废黄河口水下三角洲前缘斜坡带在潮流强烈的侧向侵蚀作用下也带来大量泥沙, 大量的泥沙被冲刷到水体中, 在浪、潮、流的作用下进行输运<sup>[4]</sup>, 由此形成大面积的典型混浊水域。巨量的泥沙在黄、东海陆架上的输运、沉积和重新分配关系到陆架地质体的发育演化和陆架边缘物质交换与平衡。苏北辐射沙脊位于废黄河口至长江口北侧, 其形成和发育与长江、黄河

两大河流关系密切, 大多数观点认为辐射沙脊的物质部分来源于废黄河三角洲侵蚀来沙<sup>[5-8]</sup>, 现代沉积物受到废黄河口和长江的补给<sup>[9-10]</sup>。由此可见废黄河口三角洲海域有着非常重要的研究意义, 而对这一海区及其周边海域的观测和研究工作一直不断。虞志英等<sup>[11]</sup>通过对废黄河海域水文、泥沙资料的调查分析, 认为在 -5 ~ -15 m 水动力作用以强劲的潮流冲刷为主, 在潮流和波浪的共同作用下, 地形剖面呈继续平行后退状态<sup>[12]</sup>。三角洲海域的悬沙质量浓度极高, 冬季底层悬沙质量浓度可达到 500 mg/L 之多, 表层也能达 300 mg/L; 夏季的悬沙质量浓度要低于冬季, 底层大于 200 mg/L, 表层高于 100 mg/L。

该海域复杂多变的水动力条件及成因各异的地形地貌, 导致该海域的泥沙运动极为复杂, 因此对废黄河三角洲海域的悬沙运动特征及其动力控制因素的研究是十分必要的, 本文根据 2006 年实测海流和悬沙质量浓度资料, 分析研究该海域的潮流动力

收稿日期: 2010-09-20; 修回日期: 2011-03-29

基金项目: 国家青年科学基金项目(41006033); 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室开放基金(MASEG200809); 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室基金(MRE200915); 国土资源部地质大调查项目(GZH200900501)

作者简介: 陈斌(1979-), 男, 山东潍坊人, 助研, 博士, 主要从事海洋沉积动力的数值研究, E-mail: chenbin1007@hotmail.com

特征,并结合悬沙资料分析悬沙质量浓度与潮流间的动力关系,对悬沙分布形态作初步探讨。并进一步阐述该地区再悬浮泥沙的去向,该研究将对了解废黄河口水下三角洲的再悬浮泥沙的运输格局有重要意义。

## 1 资料来源与处理方法

2006年8月30日18:00~31日18:00,在海州湾海域进行了3个定点连续25h观测流速及悬浮体水样采集(图1),定点连续采集流速、水位采用ADP流速仪(美国SonTek公司生产500Hz),单元层厚度设为1m,ADP探头下水1.2m,采样频率为60s采集一次流速、水位数据。悬沙水样使用SBE32型采水器(5L),分别在表层、 $0.6H$ ( $H$ 为水深)、距海底1m底层进行采集。观测前后期间无明显风浪,海况良好。采用真空负压法进行悬浮体抽滤,滤膜直径47mm,孔径 $0.45\ \mu\text{m}$ ;采用1/10万的Sartorius电子天平进行悬浮体称质量,过滤后样品烘干( $40^\circ\text{C}$ )恒温称质量,计算出各站悬沙质量浓度,悬浮体浓度数据皆经过双重滤膜进行了校正<sup>[13]</sup>。由于观测的流速原始记录带有扰动信息(包括测量过程中和仪器本身产生的扰动),需对原始资料进行质量控制,滤去不合理的值。具体做法是:分别计算东分量和北分量在1h观测时段内的均值和标准差,剔除偏离3倍标准差的数据。然后循环这一过程,直到所有剩余数据值在3倍的标准差内。这样就构成每小时一个流速值

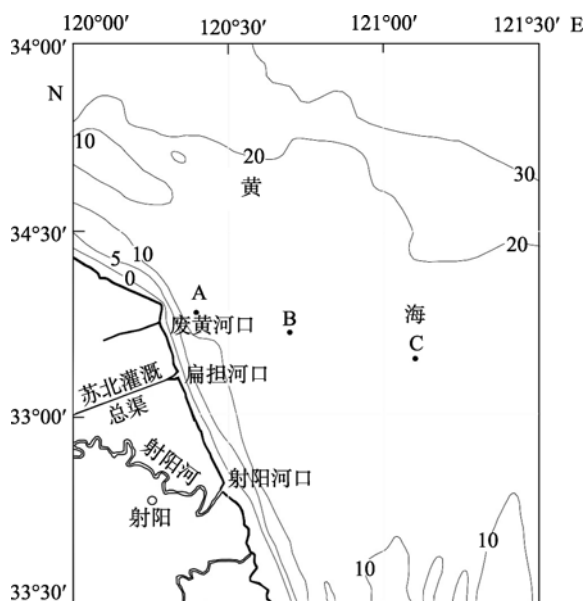


图1 观测站点位置

Fig. 1 Locations of observation stations

的常规数据<sup>[14]</sup>。每个站点选取表层、 $0.6H$ 、底层3个分层的25h的流速流向数据,对获取的实测资料进行分析计算进而对潮流特性进行了调和计算。

## 2 潮汐潮流动力特征

将实测海流资料进行滤波修正后,绘制了表、中、底3层每小时平均的流速、流向过程曲线图,以及垂线平均流速玫瑰图(图2)。由图可以看出,离岸较近的A站和B站流速较大,最大流速可达到 $100\ \text{cm/s}$ ;离岸较远的C站流速相对较小。3个测站的流速在单周内基本都出现4次峰值,为正规半日潮流性质。各站流速随水深的增加有所衰减,但衰减的速度不大,只有在接近底层时衰减得较快些。从垂线平均流速玫瑰图中可以看出,主流方向为NNW-SSE,涨潮流流向以SSE为主,落潮流流向以NNW为主,涨潮平均流速一般大于落潮平均流速,涨潮历时比落潮历时短约20min。高潮前3~4h涨潮流场最强,高潮前1h或高潮时开始转为落潮流,高潮后2~3h落潮流场最强。各站基本为往复流,B站和C站略带逆时针旋转流性质。

由于资料是周日观测,时间序列比较短,通过引入差比关系,可对上述海流观测资料进行潮流的准调和计算<sup>[15]</sup>,获得每一站位的 $O_1, K_1, M_2, S_2, M_4, MS_4$ 六个主要分潮表层潮流调和常数,由于观测海域位于黄海西部海域,考虑选用了黄海的差比系数进行分析。获得的潮流调和常数列于表1中。由表1可以看出,废黄河口海域东、北分量的半日潮流振幅均大于全日潮流的东、北分量,说明这一海域半日潮流占据主要地位,呈现半日潮流的性质。对半日分潮流( $M_2, S_2$ )和全日潮流( $O_1, K_1$ )均体现出北分量大于东分量。比较3测站的潮流调和常数,总起来说是以半日潮流为主,对于 $O_1, K_1, M_2, S_2$ 四个主要分潮流,北分量大于东分量,而浅水分潮 $M_4$ 和 $MS_4$ 虽有些测站的东分量大于北分量,但由于 $M_4$ 和 $MS_4$ 分潮在总海流中所占份额有限而无法改变北分量海流大于东分量海流的结果。对比各站余流的结果可以发现,离岸越近的海域余流越小,距岸越远的海域余流越大。近岸处A站的余流是3个测站中最小的一个,其表层余流仅为 $0.9\ \text{cm/s}$ ,方向为西偏南向;B站余流介于A站和C站之间,余流大小为 $7.4\ \text{cm/s}$ ,方向为东偏南向;离岸最远的C站余流最大,可达 $13.8\ \text{cm/s}$ ,余流方向为北偏东向。

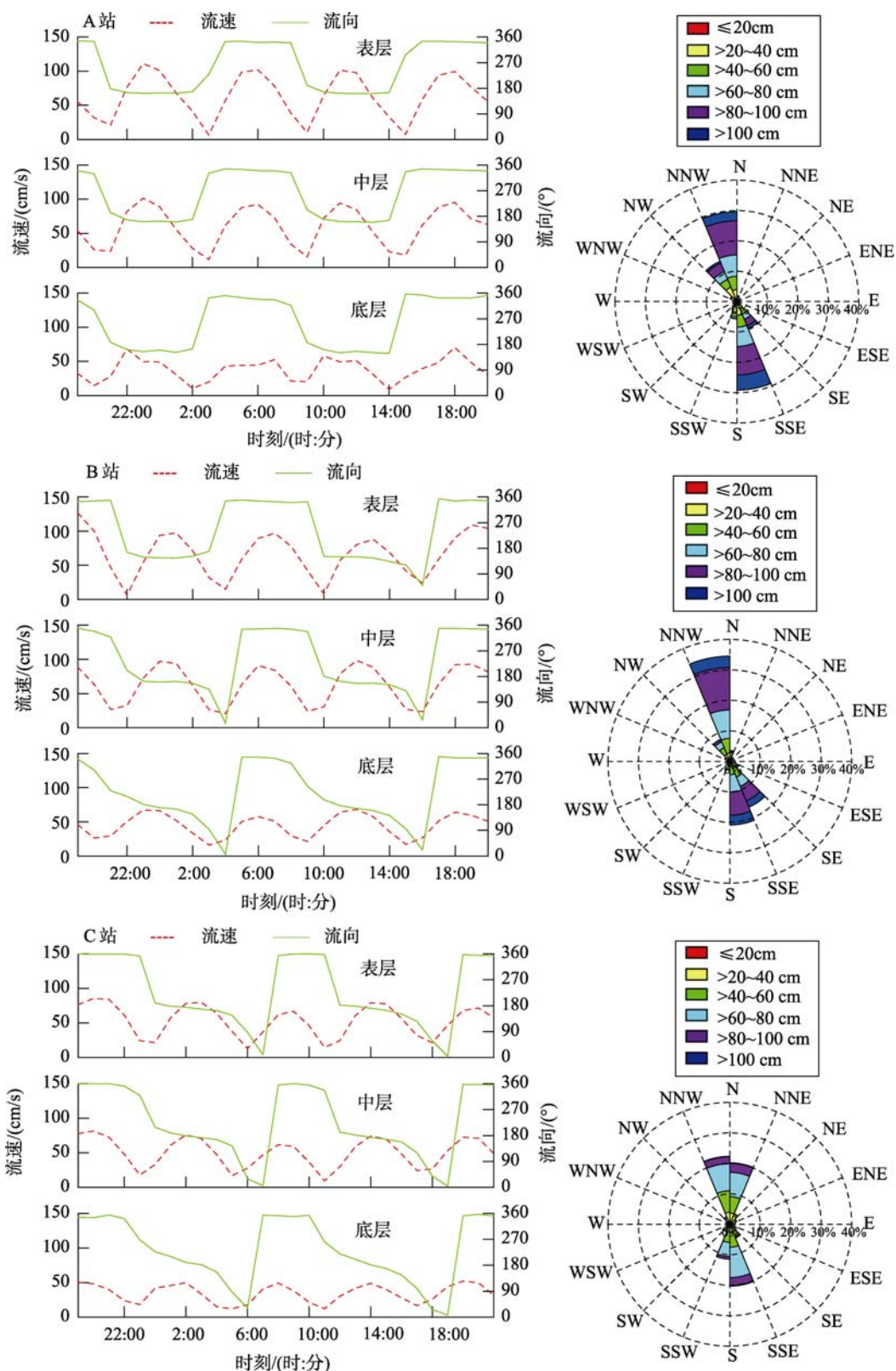


图2 A, B, C三测站流速流向及垂线平均流速玫瑰图

Fig. 2 The velocity, direction and rose of vertical average current at station A, B, and C

为进一步分析潮流的一些特征，分别计算出三测站 O1, K1, M2, S2, M4, MS4 六个主要分潮表层的

表 1 A, B, C 三站潮流调和常数

Tab. 1 Harmonic constants of tidal currents at Station A, B, and C

| 站位 | 分量 | H(cm/s) |    |     |    |    |     | G(°) |     |     |     |     |     | 余流<br>(cm/s) |
|----|----|---------|----|-----|----|----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|
|    |    | O1      | K1 | M2  | S2 | M4 | MS4 | O1   | K1  | M2  | S2  | M4  | MS4 |              |
| A  | 东  | 1       | 1  | 35  | 12 | 3  | 2   | 237  | 283 | 129 | 177 | 244 | 293 | - 0.8        |
|    | 北  | 5       | 7  | 115 | 39 | 5  | 2   | 69   | 116 | 308 | 356 | 305 | 354 | - 0.4        |
| B  | 东  | 3       | 3  | 14  | 5  | 10 | 7   | 64   | 110 | 255 | 304 | 154 | 203 | 6.8          |
|    | 北  | 9       | 13 | 91  | 31 | 3  | 2   | 239  | 192 | 33  | 82  | 157 | 206 | - 3.0        |
| C  | 东  | 4       | 5  | 48  | 16 | 7  | 5   | 70   | 116 | 224 | 273 | 67  | 116 | 7.4          |
|    | 北  | 10      | 14 | 110 | 37 | 5  | 4   | 150  | 196 | 39  | 88  | 128 | 177 | 11.6         |

注: H 表示振幅, 单位为 cm/s; g 表示迟角, 单位为 °

潮流椭圆要素, 列于表 2 中。下面对计算所得各站的潮流椭圆要素结果进行进一步的比较和分析。计算三测站的潮流性质  $F = (W_{K1} + W_{O1}) / W_{M2}^{[16]}$  可得到: A 站、B 站和 C 站分别为 0.11, 0.21 和 0.24, 均小于 0.5, 说明该海域属于正规半日潮流区, 这与前人的调查研究成果一致<sup>[7,17]</sup>。三测站均以 M2 潮流占优, 尤其是 A 站 M2 潮流最大流速超过 120 cm/s。通过计算最大可能流速  $V_{max} = 1.29W_{M2} + 1.23W_{S2} + W_{K1} + W_{O1}^{[18]}$ , 得出该海域表层最大可能流速范围在 170 ~ 220 cm/s 之间, 其中 A 站为 218 cm/s, B 站为 202 cm/s, C 站为 179 cm/s。计算所得半日潮流椭圆率 A 站和 B 站为 0, 为往复流的潮流性质, C 站为 0.1, 为略带逆旋

性质的往复流。从 C 站到 A 站, 由海向岸, 潮流由逆时针方向旋转, 逐渐过渡为往复流, 其最大流向与岸线平行。最近岸的 A 站为明显的往复流性质。

通过以上分析发现, 废黄河口海域是基本以往复流为主, 外海略带逆时针旋转流性质, 越到外海旋转性越强, 这也与以前诸多研究相吻合<sup>[19]</sup>。浅海中一般用  $G = (W_{M4} + W_{MS4}) / W_{M2}$  的大小作为衡量浅水分潮流在总海流中影响的指标, 计算可得表层的 G 值在 A 站、B 站、C 站分别为 0.14, 0.11 和 0.19, 说明各站浅水分潮的份额在总海流中占的份额都很小, 其中 C 站比其他两个测站略大, 可能由于 C 站位于潮道或沙洲边缘所致。

表 2 A, B, C 三站潮流椭圆要素

Tab. 2 Tidal current ellipse elements at Station A, B, and C

| 站位 | 分潮  | $V_{max}$<br>(cm/s) | $V_{min}$<br>(cm/s) | 椭圆率 | 最大流发生时刻<br>(时: 分) | 最大方向<br>(°) | F   |
|----|-----|---------------------|---------------------|-----|-------------------|-------------|-----|
| A  | O1  | 5.5                 | 0.2                 | 0.0 | 13: 00            | 352.4       | 0.1 |
|    | K1  | 7.6                 | 0.2                 | 0.0 | 15: 42            | 352.4       |     |
|    | M2  | 120.2               | 0.6                 | 0.0 | 12: 24            | 163.3       |     |
|    | S2  | 40.9                | 0.2                 | 0.0 | 13: 54            | 163.3       |     |
|    | M4  | 3.9                 | 2.3                 | 0.6 | 9: 36             | 224.4       |     |
|    | MS4 | 12.5                | 1.5                 | 0.6 | 10: 24            | 224.4       |     |
| B  | O1  | 5.5                 | 3.7                 | 0.4 | 18: 36            | 4.3         | 0.2 |
|    | K1  | 6.5                 | 5.1                 | 0.4 | 9: 00             | 184.3       |     |
|    | M2  | 119.7               | 4.1                 | 0.0 | 9: 24             | 336.6       |     |
|    | S2  | 40.7                | 1.4                 | 0.0 | 10: 54            | 336.6       |     |
|    | M4  | 8.0                 | 4.3                 | 0.5 | 9: 30             | 60.1        |     |
|    | MS4 | 5.1                 | 2.7                 | 0.5 | 10: 18            | 60.1        |     |
| C  | O1  | 9.3                 | 2.5                 | 0.3 | 18: 24            | 2.6         | 0.2 |
|    | K1  | 12.8                | 3.4                 | 0.3 | 8: 42             | 182.6       |     |
|    | M2  | 91.9                | 9.4                 | 0.1 | 9: 12             | 353.4       |     |
|    | S2  | 31.3                | 3.1                 | 0.1 | 10: 48            | 353.4       |     |
|    | M4  | 10.8                | 0.2                 | 0.0 | 10: 42            | 72.3        |     |
|    | MS4 | 6.9                 | 0.1                 | 0.0 | 8: 24             | 252.3       |     |

因为该海域的半日潮流占优,下面将着重通过分析 M2 潮流来体现该海域海流的垂向结构特点。M2 潮流在 3 个测站的表层相对较大,底层流速较小。M2 分潮流的最大流速均在 90~120 cm/s 之间,其中在 A 站表层最大流速要超过 120 cm/s,底层 M2 最大流速相对较小。最大流速方向各站各层均以北向偏西为主,图 3 给出了三测站表、中、底 3 层的

M2 潮流椭圆示意图。各站的潮流椭圆长轴长随深度的增加而变小,越靠近海底,变化速率越大,这是由于海底摩擦作用对潮流的影响所致<sup>[20]</sup>。废黄河口海域潮流椭圆随深度增加而变圆,这说明水深越浅往复流性质越强;各站最大流发生时刻从表层到底层逐渐延迟,一般底层流速达到最大值的时刻要比表层早 0.5 h 左右。

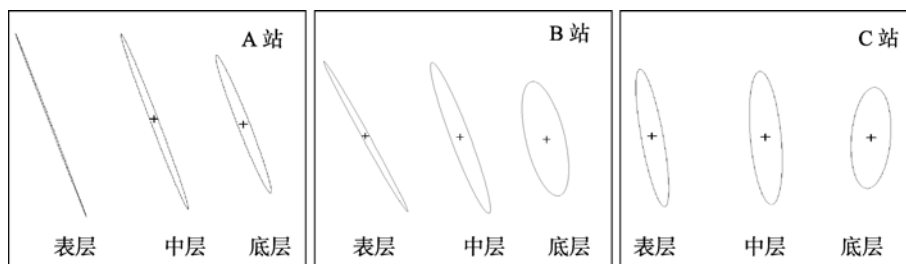


图 3 三测站表、中、底层 M2 潮流椭圆示意图

Fig. 3 M2 tidal current ellipses at surface, middle, and bottom layers of Station A, B, and C

### 3 潮流与悬沙质量浓度的动力关系

研究海域内的泥沙在一天内(两个潮周期)可能会有 2~4 次再悬浮,即悬沙质量浓度有 2~4 次峰值,本文根据三站的悬沙质量浓度及流速分析研究潮周期内悬沙的时空变化规律及与流速的关系。

将 3 个站位的悬沙质量浓度按采样的时间序列在水深方向做剖面图,可以得到以下悬沙质量浓度的时间序列剖面图(图 4)。总体来说,废黄河口海域水体较为混浊,水体悬沙质量浓度较大,最大可达 500 mg/L。各站悬沙质量浓度近岸的 A 站最大, B 站次之,远岸的 C 站最小,呈现近岸悬沙质量浓度高,向海逐渐降低的分布形态。悬沙的粒度在  $6.7\phi \sim 7.5\phi$  之间,粒度组分以粉砂为主,平均含量 71.4%;其次为黏土,平均含量 28.4%;其余为砂质成分,主要为极细砂。在近岸的 A 站有超过一半的悬沙样品中含极细砂成分。而 B 站的沉积物样品其成分与 B 站悬沙成分一致,这说明该海域悬沙与海底沉积物粒度组分差异较小,两者交换频繁,海水中的悬沙主要为泥沙再悬浮的贡献。

影响悬沙运动的因素众多,有波浪、潮流、风等动力条件,此外悬沙运动与水质点的运动也不一致,由于调查期间风浪较小,这里仅讨论悬沙质量浓度与流速之间的关系。由于涨落潮的交替和流速的更迭使悬沙质量浓度出现明显的周期性变化<sup>[21]</sup>,悬沙质量浓度在 25 h 内出现 2~4 峰值,恰好对应该海域半日潮流特点。悬沙质量浓度的变化与沉积物的再

悬浮相关,而底层流速与底层泥沙运动关系更为密切,底床泥沙在底层流速达到临界起动速度后,由于剪切力易使沉积物发生再悬浮,在底层形成较大的悬沙质量浓度水体,而在流速低于临界流速时,底层水体中的泥沙将慢慢落淤,从而使底层悬沙质量浓度出现较为明显的周期性变化。近岸的 A 站具有较强的往复流性质,悬沙质量浓度变化周期强,与流速变化周期相似,也出现有 4 个峰值,分别在涨急和落急滞后 1~2 h 出现(图 5),从水位与悬沙质量浓度的关系来看,则悬沙质量浓度峰值出现在涨憩和落憩前 1~2 h 出现,该站与水位、流速对应的关系非常明显,含沙的峰值滞后于流速峰值,即在流速达到最大值后悬沙质量浓度才达到最大值。B 站和 C 站变化较为复杂,周期性不如 A 站明显,但也和潮流有一定的对应关系,出现 2~4 个峰值,也都出现在流速的峰值之后。除了 C 站有一个悬沙质量浓度最大值出现在落潮期的涨急时刻,其余各站的悬沙质量浓度峰值都出现在涨潮期,这表明了研究海域近岸处的主要输沙方向是沿涨潮方向,也就是 SSE 向;远岸海域的输沙方向主要沿落潮 NNW 向。从悬沙质量浓度的垂向变化来看,一般来说,从表层到底层由小到大。近海水深较小的海域,悬浮泥沙质量浓度随深度迅速增加,其垂向梯度较大;水深较大的外海区域,悬浮泥沙质量浓度随深度的增加呈不规则的变化,但由于其本身的量值很小,显示不出有明显的变化。两个区域的比较,前者的变化幅度远远大于后者。

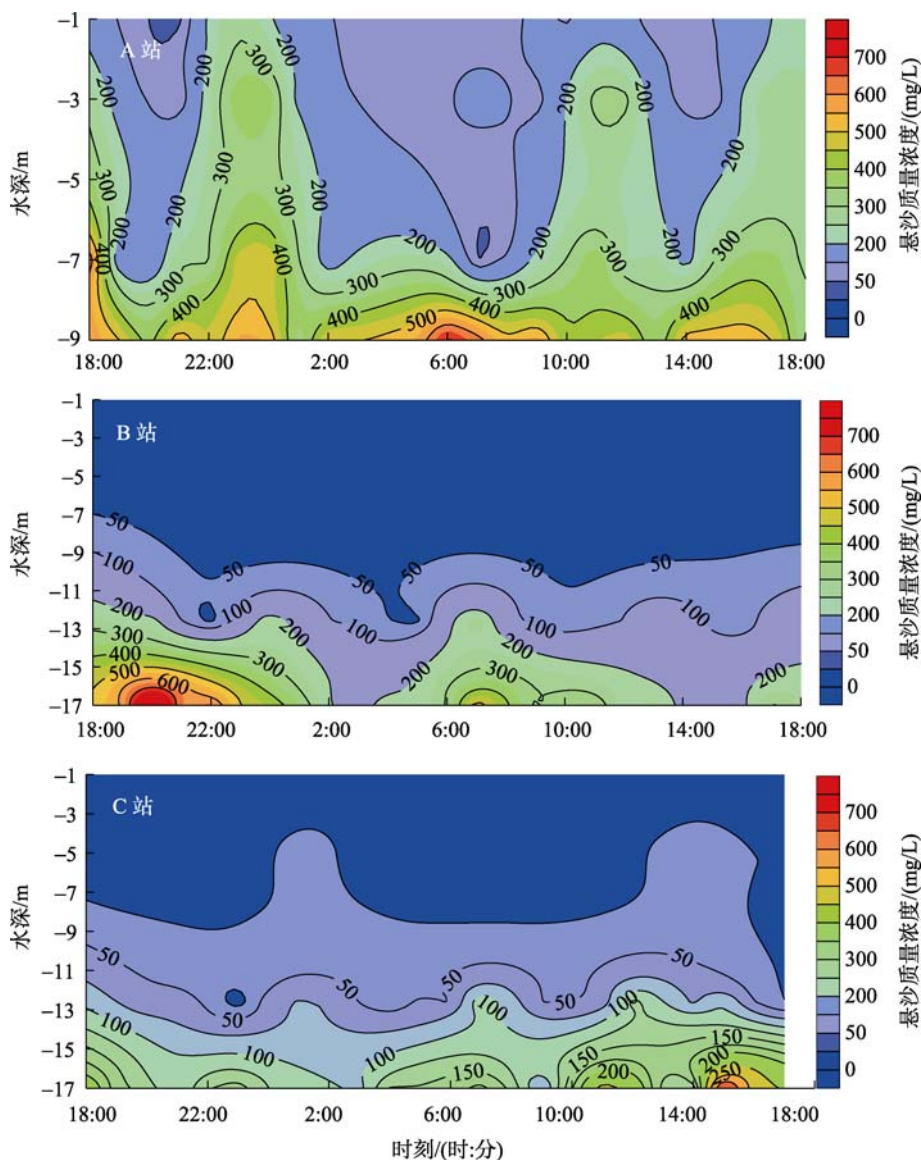


图 4 各站悬沙质量浓度时间序列等值线

Fig. 4 Concentration isograms of suspended sediment at Station A, B, and C

## 4 输沙量

根据同期实测悬沙质量浓度和单宽输沙量统计(表 3)发现,该海域的悬沙主要是沿 NNE-NNW 及 SSW 方向输运,与涨落潮的方向基本一致。三站的涨潮单宽输沙量均大于落潮期,其中 A 站的单宽输沙量无论涨、落潮均为最大,这是由于 A 站靠近岸边,底质粒径相对较细,在动力条件下较容易发生再悬浮,又加上此处的潮流动力强劲,故该站的单宽输沙量为三站之最。根据各站的涨落潮单宽输沙量也可看出各站在潮周期内的净输沙方向应该为偏

南向,我们将 3 个站点连成一条直线,可形成一条位于废黄河口南侧附近的输沙断面,根据三站的单宽输沙量可初步计算出,在该断面上一个潮周期内,悬沙向南的净输运量大约为  $4.8 \times 10^5$  t。该海域为正规半日潮,一天内按两个潮周期计算,每天的悬沙净输运量大约为  $9.6 \times 10^5$  t。虞志英等<sup>[3]</sup>根据地形变化估算 130 a(1855~1985 年)侵蚀量约为 400 亿  $m^3$ ,按湿容重取  $1.5 \text{ g/cm}^3$  计算,可得每天的侵蚀量在 128 万 t 左右。由此可见根据潮周期计算的输沙量和长期的侵蚀量基本在一个量级范围内,也可说明潮流对该海域泥沙输运的重要影响作用。

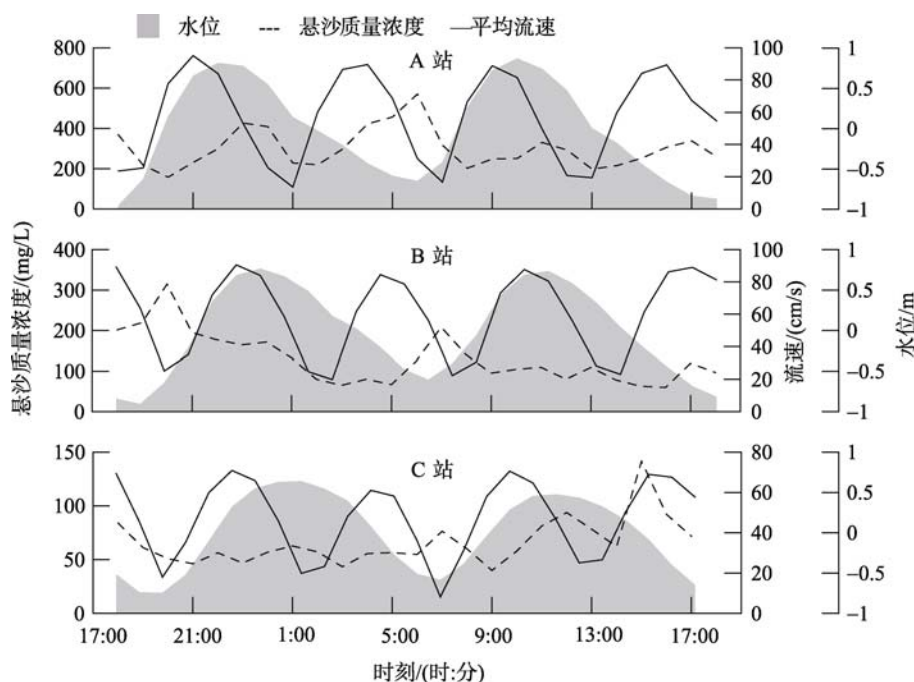


图 5 各站平均悬沙质量浓度与平均流速、水位变化关系

Fig. 5 Correlation of vertical average suspended sediment concentrations and average velocities and water depths at Station A, B, and C

表 3 实测悬沙质量浓度和单宽输沙量统计表

Tab. 3 Statistics of the suspended sediment concentration and sediment discharge

| 站名 | 平均水深<br>(m) | 垂线平均悬沙质量浓度(mg/L) |     | 单宽输沙量(kg/m) |       | 输沙方向(°) |     |
|----|-------------|------------------|-----|-------------|-------|---------|-----|
|    |             | 涨潮               | 落潮  | 涨潮          | 落潮    | 涨潮      | 落潮  |
| A  | 9.7         | 370              | 318 | 21900       | 17200 | 169     | 340 |
| B  | 16.7        | 123              | 116 | 7800        | 5800  | 166     | 18  |
| C  | 18.0        | 68               | 57  | 10200       | 8000  | 178     | 7   |

## 5 讨论

从废黄河三角洲岸滩侵蚀的大量泥沙, 经沿岸水流的分选, 其中的细颗粒泥沙则随着沿岸波流和涨、落潮流运移, 而粗颗粒泥沙则在滨外地带堆积, 从而形成了水下沙洲。潮间带滩地被波浪冲刷而悬浮于海水中的泥沙, 则随着沿岸的波流和潮流运移。其中的部分泥沙, 由于受滩坡和泥沙颗粒重力及回流作用, 向着滨外海域扩散, 成为流场中的物质来源之一, 并随着潮流运移。

已有研究表明, 在冬季盛行强劲北风, 从而产生的黄海沿岸流及苏北沿岸流携带着废黄河口水下三角洲由海浪和潮流搅动起来的悬浮泥沙向东南扩散, 可输送到辐射沙脊, 甚至可运移到长江口附近海域会同长江冲淡水携带泥沙, 向济州岛方向扩散<sup>[22]</sup>。而我们根据中国科学院海洋研究所在离江苏海岸约

40 km 外连续 26 d 的 ADCP 海流观测资料, 发现这里几乎在全部深度上都存在着北向流, 垂向平均流速约 3.4 cm/s, 最大北向流速 8 cm/s<sup>[23]</sup>, 这说明可能有一支自废黄河口乃至苏北辐射沙脊和长江口的泥沙流可以向北到达海州湾顶对其进行泥沙补充。

在研究区域中, 本文的研究表明, 在潮流的作用下, 悬浮泥沙的运动方向是偏南向的, 与上面所述的北向流恰恰相反, 另外该海域还存在一支由北到南的苏北沿岸流。另外在该海域也有众多的研究成果: 如王颖<sup>[24]</sup>认为苏北北部海域受到废黄河三角洲冲刷物的补给, 沈焕庭等<sup>[25]</sup>认为苏北沿岸有部分泥沙补给北支, 以上两种观点均体现了废黄河口泥沙主要向南运动的特征; 赵保仁等<sup>[26]</sup>认为贴岸北上的潮余流是会将泥沙带至苏北沿岸海域, Xia<sup>[27]</sup>通过计算发现夏季贴近苏北近岸存在一支比较稳定的北向低频环流, 在海州湾附近转向东, 而后向东南流

动,这支从长江口北支附近北上的环流应该能携带部分泥沙对苏北近岸进行补给。如此看来,该海域的悬沙运动影响因素非常复杂,那么在浪、潮、流等动力因素的共同作用下,废黄河口水下三角洲的再悬浮泥沙到底应是一个怎样的输运格局,根据前人的成果结合本文的研究,我们认为在该海域主要存在向北海洲湾方向输运和向南苏北辐射沙洲方向输运,这两种泥沙输运格局可能同时存在,夏季泥沙向北输运相对较强,而在冬季在强劲的北风和沿岸流的作用下,泥沙的向南输运趋势非常明显。当然以上主要是一种理论上的推断,具体的泥沙运动格局还要通过进一步的研究来证实。

## 6 结论

通过对废黄河口海域 3 测站连续 25 h 海流观测资料进行的短期潮流调和与分析表明,该海域属于正规半日潮流性质,表层最大可能流速范围在 170 ~ 220 cm/s。各站潮流均基本为往复流性质,离岸越远旋转性越强。涨潮流流向以 SSE 为主,落潮流流向以 NNW 为主。计算所得表层各站的 O1, K1, M2, S2 四个主要分潮流的北分量一般大于东分量。离岸越近的海域余流越小,距岸越远的海域余流越大。半日潮流的椭圆长轴以北偏西为主。各站最大流发生时从表层到底层逐渐延迟,一般底层流速达到最大值的时刻要比表层早 0.5 h 左右。

研究海域的悬沙质量浓度和潮流密切相关,在潮周期内出现周期性的变化,恰好对应该海域半日潮的潮流特点,悬沙质量浓度的峰值落后于流速的峰值。废黄河口海域水体较为混浊,呈现近岸悬沙质量浓度高,向海逐渐降低的分布形态。各站悬沙与海底沉积物粒度组分差异较小,两者交换频繁,海水中的悬沙主要为泥沙再悬浮的贡献。悬沙质量浓度的垂直变化,一般来说,从表层到底层由小到大。近海水深较小的海域,悬沙质量浓度垂向梯度较大;水深较大的外海区域,悬沙质量浓度随深度的增加呈不规则的变化,但变化梯度较小。海域的悬沙净输运方向为偏南向,与涨潮的方向基本一致。3 站的涨潮单宽输沙量均大于落潮期,3 站连线断面上,在一个潮周期内,向南净输沙可达 48 万 t 左右,潮流对该海域泥沙输运的影响巨大。

参考文献:

[1] Glenn S M, Grant W D. A suspended sediment stratifi-

cation correction for combined wave and current flows[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(C8): 8244-8264.

- [2] Van Rijn LC, Nieuwjaar M W C, Van der Kaay T, et al. Transport of fine sands by currents and waves[J]. American Society Civil Engineering, 1993, 119(2): 123-143.
- [3] 高抒. 废黄河口海岸侵蚀与对策[J]. 海岸工程, 1989, 8(1): 37-42.
- [4] 虞志英, 张国安, 金镠, 等. 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, 2002, 33(6): 583-590.
- [5] 李从先, 王靖泰, 李萍. 长江三角洲沉积相的初步研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1979, 2: 1-14.
- [6] 李成治, 李本川. 苏北沿海暗沙成因的研究[J]. 海洋与湖沼, 1981, 12(4): 321-331.
- [7] 任美镠. 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, 1996: 44-47.
- [8] 杨子赓. 南黄海陆架晚更新世以来的沉积与环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(4): 1-19.
- [9] 朱大奎, 傅命佐. 江苏岸外辐射沙洲的初步研究[C]// 任美镠, 朱季文, 朱大奎, 等. 江苏省海岸带东沙滩综合调查文集. 北京: 海洋出版社, 1993: 28-32.
- [10] 王颖, 朱大奎, 周旅复, 等. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(5): 386-393.
- [11] 虞志英, 陈德昌, 金镠. 江苏北部旧黄河水下三角洲的形成及其侵蚀改造[J]. 海洋学报, 1986, 8(2): 197-206.
- [12] 常瑞芳, 陈樟榕, 陈卫民, 等. 老黄河口水下三角洲前缘底坡不稳定地形的近期演变及控制因素[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(1): 159-164.
- [13] 陈斌, 黄海军, 梅冰. 小清河口海域泥沙运动特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 35-41.
- [14] 王凯, 叶冬. 东海三定点周日海流观测的准调和与分析[J]. 海洋科学, 2007, 31(8): 18-25.
- [15] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [16] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [17] 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏省海岸带和滩涂资源综合考察队. 江苏省海岸带自然资源地



- 图集[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. 港口工程技术规范(下卷) [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [19] 孙长青, 郭耀同, 赵可胜, 等. 海州湾及其邻近海域潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2003, 27(3): 54-58.
- [20] 叶安乐. 潮流椭圆长轴方向随深度变化的特征[J]. 海洋通报, 1984, 3(2): 1-8.
- [21] 陈斌, 黄海军, 严立文, 等. 小清河口附近海域泥沙运动特征及风场对泥沙运输的影响[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 104-112.
- [22] 郭志刚, 张东奇. 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, 2002, 24(5): 71-80.
- [23] Liu Zhiliang, Hu Dunxin, Tang xiaohui. Tidal current observation in the southern Yellow Sea in the summers of 2001 and 2003[J]. Chinese journal of Oceanology and Limnology, 2009, 26(2): 121-129.
- [24] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] 沈焕庭, 李九发, 朱慧芳, 等. 长江口悬沙输移特性[J]. 泥沙研究, 1986, 1: 1-13.
- [26] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤海、黄海和东海的潮流特征及其与近岸环流输送的关系[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(36). 北京: 科学出版社, 1995: 1-11.
- [27] Xia Changshui, Qiao Fangli, Zhang Mengning, et al. 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, 2004, 22(3): 292-298.

## The relationship between the suspended sediment movement and tidal current dynamic characteristic in Old Yellow River Delta

CHEN Bin<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Liang-yong<sup>1,3</sup>, LIU Jian<sup>1,3</sup>, WANG Kai<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao 266071, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 4. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Sep., 20, 2010

Key words: Old Yellow River Delta; tidal current; suspended sediment concentration; sediment discharge

**Abstract:** Based on the observation data of suspended sediment concentration (SSC) and ocean current, we applied the tidal current quasi-harmonic method for short-term data to analyze the tidal current characteristics, and to discuss the dynamics relation between SSC and the tidal current. The research results show that the tidal current in the studied area can be classified as regular semidiurnal tidal current. The north component of semidiurnal current is generally stronger than the east one. The tidal current is mainly the rectilinear. As the distance is farther away from the shore, the rotation is stronger. At flood tide, the tidal current is in the direction of SSE, and at ebb tide, the current is in the direction of NNW. The SSC gradually reduces from the nearshore to offshore, and it increases from surface to bottom. The SSC vertical gradient in nearshore is larger than in offshore. The SSC shows obvious cyclical changes, in response to regular semidiurnal tidal currents. The maximum SSC appears after the maximum velocity. The suspended sediment mainly is transported in direction of south by tidal current, and the sediment discharge of the flood tide is larger than the ebb tide.

(本文编辑: 刘珊珊)