

辐射沙洲东大港潮流水道悬沙输移机制分析

吴德安^{1 2} 张忍顺³ 严以新^{1 2} 李瑞杰^{1 2}

(1. 河海大学交通学院、海洋学院, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;
3. 南京师范大学海洋及滩涂研究所, 江苏 南京 210097)

摘要 : 以东大港潮流水道 4 号站位的水、沙实测资料为例, 利用悬沙通量机制分解法、功率谱分析法, 对东大港潮流水道悬沙输移的动力机制进行分析探讨. 结果表明, 悬沙净输移以平流作用占优, “ 潮泵效应 ” 项在悬沙输移中也相当重要. 潮流流速是水体含沙量变化及悬沙输移的主要动力因素.

关键词 辐射沙洲 潮流水道 机制分解 谱分析

中图分类号 : P731.23 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2006)02-0216-07

通量是指单位时间内流过某一给定面积(通常指与流动方向垂直的单位面积) 的某种物理量的量值. 根据给定时间的不同可分为年通量、月通量、日通量和潮周期通量等^[1-2]. 近年来, 以研究输移机理为目的的通量机制分解法不断得到发展^[3-5]①. 悬沙通量机制分解法是将悬沙通量分解成多个动力项, 对各个动力项进行内在动力要素的计算、比较、分析、诊断的方法, 是目前通量计算研究中较为成熟和可靠的方法. Bowden 等^[3-6]先后建立和发展了悬沙断面输移的计算公式, 并对各种机理进行了探讨^[7]. 悬沙通量机制分解计算式也不断地被引入世界各地的河口通量研究中^[7-9], 用来探讨不同环境下不同动力因子对物质输移贡献的大小. 功率谱方法是分析时间序列频域关系的一种常用方法, 在水文现象中一般用来分析数据结构的物理属性、周期成分、噪声等^[10]. 本文根据辐射沙洲海域东大港水道 4 号站位(图 1) 1998 年 9 月 22 日 19:00 ~ 23 日 20:00 实测水文泥沙资料, 综合运用通量机制分解法、功率谱分析法探讨潮流、水深、风速等动力因子与水体含沙量、悬沙输移规律间的关系.

如图 1 所示, 条子泥北尖子及其向北伸展的水下部分将西洋南段分成东西两槽. 北尖子以西逐渐演变为死生港及西大港北支的口门浅滩, 水深仅 3 m 左右; 东槽一般称为东大港, 水深在 10 m 以上. 东大港水道 4 号站位位于北尖子和东沙之间, 坐标为 121°5'6"E, 32°59'43"N. 测量资料表明, 该站位各层流向基本一致, 涨潮平均流向 145°, 为东南偏西向; 落潮平均流向 347°, 为北稍偏西向. 计算得涨潮最大垂线平均流速为 2.31 m/s, 流向 142°; 落潮最大垂线平均流速为 0.99 m/s, 流向 346°. 涨、落潮最大垂线平均流速的流向与其平均流向基本一致. 该站位潮汐性质属于正规半日潮, 一个潮周期内, 涨落潮历时之比约为 5:7. 经潮流调和计算可知, M_2 分潮潮流为往复流性质, 表层潮流性质为 0.2, 中层为 0.13, 临底层为 0.16. 经测量该站位水深平均为 9.6 m, 最大 12.5 m, 最小 6.3 m. 垂线平均含沙量涨潮为 1.095 kg/m³, 落潮为 0.975 kg/m³.

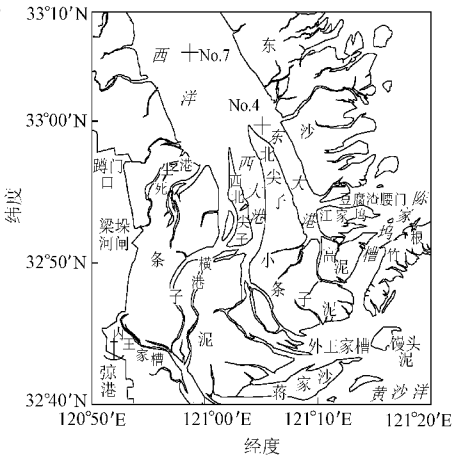


图 1 东大港水道 4 号站位位置
Fig.1 Site of station No.4 of Dongdagang tidal channel

1 悬沙输移机制分解

1.1 垂线平均悬沙输移机制分解(方法 1)

一般利用实际测量资料对悬沙输移机制进行分解, 以计算各种动力要素对悬沙输移所起作用的大小, 即

收稿日期 2005-03-28
基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(50339010), 国家自然科学基金资助项目(40476039)
作者简介 吴德安(1968—) 男, 江苏徐州人, 博士, 主要从事海岸动力学研究.
① HANSEN D V. Current and mixing in the Columbia River estuary. Transactions of Joint Conference on Ocean Science and Ocean Engineering, 1965 943-955.

在潮周期时间尺度内,对各时刻垂线平均流速 V 、垂线平均含沙量 C 、水深 H 可以从时间上分解为均值与脉动值之和,单宽输沙率 F 可写成^[11]

$$F = VCH = (\bar{V} + V') (\bar{C} + C') (\bar{H} + H') =$$
$$\overline{VCH} + \overline{V'H'C} + \overline{V'C'H} + \overline{C'H'V} + \overline{VCH'} + \overline{VHC'} + \overline{CHV'} + \overline{V'C'H'} \quad (1)$$

式中: $\bar{V}$ 、 $\bar{C}$ 、 $\bar{H}$ ——各时刻垂线平均流速、垂线平均含沙量和水深 2 个潮周期(次)的平均值; V' 、 C' 、 H' ——某一时刻垂线平均流速、垂线平均含沙量和水深与相应潮周期平均垂线平均流速、平均垂线平均含沙量和水深的偏差。以潮周期为计算单元,有

$$\sum V' = \sum H' = \sum C' = 0$$

故潮周期平均单宽悬沙输移率 T 为

$$T = \frac{\overline{VCH}}{(T_1)} + \frac{\overline{V'H'C}}{(T_2)} + \frac{\overline{V'C'H}}{(T_3)} + \frac{\overline{C'H'V}}{(T_4)} + \frac{\overline{V'C'H'}}{(T_5)} \quad (2)$$

式中 T_1 表征了平均流对净输沙的贡献, $\bar{C}$ 、 $\bar{H}$ 恒为正, $\bar{V}$ 正负两可,因此, T_1 的方向(正负)仅取决于涨、落潮流的优势对比。 T_2 反映了 Stokes 漂流效应对净输沙的贡献。 T_1 、 T_2 组成平流输移项。 T_3 的符号依 $\overline{V'C'}$ 的正负而定,其值既取决于流速和含沙量时间过程的相位关系,同时还与涨、落潮掀沙效应以及背景含沙量的差异有关,故 T_3 反映了涨、落潮流挟沙力对净输沙的贡献。 T_4 为含沙量与水深变化的相关项,研究水域若处于动力平衡带, $\bar{V}$ 值通常较小,相应地, T_4 的绝对值也较小。 T_5 依赖于 V' 、 C' 、 H' 的相关性。 T_3 、 T_4 、 T_5 都包含 C' 。在一个潮周期中,涨、落潮水体的含沙量可近似地看作常量, C' 的变化主要归因于水体与底槽之间泥沙的双向交换——潮泵效应^[6],即在潮汐涨落过程中,水体含沙量有规律地变化,泥沙颗粒在水体与槽底之间周期性地上扬下沉的现象,因此 T_3 、 T_4 、 T_5 组成“潮泵效应”项。

辐射沙洲海域是两大潮流系统交汇作用区域,水文条件复杂,潮沟水道众多,沙洲分布其中,水沙循环动力机制复杂。准潮流调和和分析表明,东大港水道 4 号站位水道潮流为正规半日潮流性质的往复流,但辐射沙洲潮流水道不同于河口水道,潮流运动具有轻微的旋转性。为此,取流速较大时相应的涨潮流平均流向为 x 轴正向(纵向,与水道轴向基本平行),建立右手直角坐标系 xoy , y 方向为(水道)横向方向。将所测流速资料按这 2 个方向进行分解,根据式(2)计算纵、横向潮平均悬沙通量各分量,结果见表 1。

潮周期平均悬沙通量分量以 T_1 、 T_2 、 T_3 为主。纵向潮平均悬沙通量分量 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 均为正,顺着涨潮,平均方向即沿水道主轴向沙洲腹地条子泥沙滩输沙。而 T_4 为负则揭示了东大港水道存在逆向输沙分量。纵向总潮平均单宽悬沙输移率 T 为正,表明潮平均向沙洲中心腹地输沙。横向潮平均悬沙通量各分量中, T_1 依然占较大优势,符号为正,大致为向东沙方向输沙; T_2 较小, T_3 、 T_5 相对较大, T_2 、 T_3 、 T_5 为负,大致为向水道涨潮流右岸输沙。横向总平均单宽悬沙输移率为正值,为向东沙方向输沙。

由表 1 可见,纵、横向 T_1 的大小相对其他各分量较大,且 T 的符号与 T_1 的方向对应,表明悬沙净输移方向基本上由 T_1 的方向控制,即潮平均流的方向大致决定了悬沙的净输移方向,而悬沙输移量的大小则取决于 T_1 、 T_2 、 T_3 之和。纵向悬沙通量分量的大小比较为: $T_1 > T_3 > T_2 > T_5 > T_4$, 横向为 $T_1 > T_3 > T_5 > T_4 > T_2$, 可见,东大港水道平均流输沙占优,纵向平均流输沙约是潮泵输沙的 2.4 倍,且都沿涨潮平均方向向中心沙洲腹地输沙。横向平均流净输沙率指向左岸的东沙方向,而横向净潮泵输沙率指向右岸的北尖子沙洲,且量值较小。横向净输沙率约是纵向的 1/3,这主要是潮流的旋转和侧边界地形影响的结果。从纵、横向单宽悬沙输移率的合成大小来看,潮平均平均流输沙率约是潮平均潮泵输沙率的 2.8 倍,表明泥沙净输移平均流作用占优,但潮泵效应也相当重要。输沙方向为 127° ,与垂向平均拉格郎日余流流向 118° 有 9° 的夹角。

1.2 悬沙输移通量的机制分解(方法 2)

1.2.1 速度的分解与计算

采用相对水深对瞬时物质输移量进行分解^[12]。设 x 轴为纵向坐标, t 为时间, z 为相对水深($0 \leq z \leq 1$)。

表 1 东大港水道 4 号站位潮周期平均悬沙通量及分量值
Table 1 Tidal-averaged suspended sediment flux and corresponding components for station No.4 of Dongdagang tidal channel

悬沙通量	量值/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)			方向/ ($^\circ$)
	纵向	横向	合成	
T_1	1.7215	1.2538	2.1297	109.2
T_2	0.7117	0.0016	0.7117	145.2
T_3	0.7311	-0.0427	0.7323	148.6
T_4	-0.0048	-0.0035	0.0059	289.2
T_5	0.3185	-0.0359	0.3205	151.7
$T_1 + T_2$	2.4332	1.2554	2.7379	165.6
$T_3 + T_4 + T_5$	1.0448	-0.0821	1.0480	197.4
T	3.4829	1.1735	3.6753	126.7

而 T_4 为负则揭示了东大港水道存在逆向输沙分量。纵向总潮平均单宽悬沙输移率 T 为正,表明潮平均向沙洲中心腹地输沙。横向潮平均悬沙通量各分量中, T_1 依然占较大优势,符号为正,大致为向东沙方向输沙; T_2 较小, T_3 、 T_5 相对较大, T_2 、 T_3 、 T_5 为负,大致为向水道涨潮流右岸输沙。横向总平均单宽悬沙输移率为正值,为向东沙方向输沙。

不计流速脉动项,则瞬时流速 $u(x,z,t)$ 可以分解成垂线平均量项与其偏项之和:

$$u(x,z,t) = \bar{u} + u'$$

$\bar{u}$ 和 u' 又可分解为潮平均量和潮变化项之和:

$$\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_t \quad u' = u'_0 + u'_t$$

则瞬时流速可分解为

$$u(x,z,t) = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u'_0 + u'_t$$

水深可表示为

$$h(x,t) = h_0 + h_t$$

类似地,含沙量相应可分解为

$$c(x,z,t) = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c'_0 + c'_t$$

1.2.2 单宽瞬时悬沙输移通量的计算

$$E = \int_0^1 hucdz = \frac{h\bar{u}_0\bar{c}_0}{E_1} + \frac{h\bar{u}_0\bar{c}_t}{E_2} + \frac{h\bar{u}_t\bar{c}_0}{E_3} + \frac{h\bar{u}_t\bar{c}_t}{E_4} + \frac{h\bar{u}'_0c'_0}{E_5} + \frac{h\bar{u}'_0c'_t}{E_6} + \frac{h\bar{u}'_tc'_0}{E_7} + \frac{h\bar{u}'_tc'_t}{E_8} \quad (3)$$

式中: E_1 ——平均流引起的平均输移; E_2, E_3 ——潮周期平均量与潮变化量相关项; E_4 ——潮汐振荡引起的输移; E_5 ——时均量引起的剪切扩散; E_6, E_7 ——时均量和潮变化量引起的剪切扩散; E_8 ——潮汐振荡引起的剪切扩散.按矢量合成、分解法则,将单宽瞬时悬沙输移通量沿潮沟主轴的纵向和横向进行分解讨论.

垂线平均流速 $\bar{u}$ (与前文 $\bar{V}$ 含义相同)的纵、横向分量 $\bar{u}_p, \bar{u}_L$ 的潮过程曲线见图2.纵向分量正值表示涨潮流速分量,负值为落潮流速分量.横向分量正值表示大致指向东沙方向.图2(a)基本可体现潮流的半日潮流特征,而图2(b)可体现出潮流的旋转性特征.垂线平均流速纵向分量约为横向分量的10倍.结合水道走向,从图2同时可以看出东大港水道4号站位潮流的涨强落弱特征.

1.2.3 纵、横向单宽瞬时悬沙输移通量8个分量的潮过程

图3为纵、横向单宽瞬时悬沙输移通量相应8个分量的时间过程曲线(图中纵坐标单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$).图3表明, E_1 的变化依赖于水深 h 的变化,其分量在纵横两个方向都为正值,对应的悬沙平均输移方向分别与平均欧拉余流相应方向相同;其纵向和横向分量变化是同步的,大小依赖于垂向平均欧拉余流相应分量的大小,二者具有相同的变化特征. E_2 是潮周期平均量 $\bar{u}_0$ 和潮变化量 $\bar{u}_t$ 的相关项,显然其方向依赖于 $\bar{u}_t$ 的符号,故纵、横向 E_2 的变化是同步的,且大小差别不大,在涨潮阶段随着流速增大,纵横向的 E_2 同步增加,在涨急时刻达到最大值,二者的差别也达到最大,随着流速的减小,又同步减小,在憩流附近某一时刻,二者同时为零,尔后又开始向各自的反方向(负值)增大,同样在落急时刻达到峰值. $\bar{c}_t$ 的变化和各层含沙量的变化趋势一致. E_3 是潮周期平均量 $\bar{c}_0$ 与潮变化量 $\bar{u}_t$ 的相关项, $\bar{u}_t$ 的符号决定了 E_3 的方向. E_3 纵向分量和纵向分量的变化在一定程度上表现为“位相相反”,其变化趋势与图2所示的 $\bar{u}_p, \bar{u}_L$ 时间过程曲线变化趋势一致.可以看出 E_3 的纵向通量比横向通量大得多,说明 $\bar{u}_t$ 横向值要小于相应的纵向值. E_4 纵向的变化幅度要比横向大得多,符号决定于 $\bar{u}_t$ 与 $\bar{c}_t$ 的乘积.二者相乘结果导致纵、横向 E_4 大小和方向变化更频繁. E_5 的纵向分量为负值,横向分量为正值,其纵横向分量大小变化是同步的,数值较小,纵向为相应横向的5~6倍. E_6 在涨潮期间,纵向总体为负值,在涨潮末期,转向涨潮方向,而落潮期间,纵向总体为正值,只是在落潮末期,转向落潮方向.在速度接近峰值和谷值时,纵向 E_6 取值较大.而横向 E_6 值相对于纵向较小,变化规律不太明显.纵、横向 E_6 值都很小,纵向最大值为 $0.132 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 横向为 $0.041 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$. 对于纵向 E_7 , 涨潮期间为负,在涨急时达最大值 $1.51 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 憩流时刻为零,在落潮期间, E_7 为正,其峰值出现在 $\bar{u}$ 的峰值处.对于横向 E_7 , 涨潮期间大致指向东沙方向,落潮期间大致西向,其峰值同样对应于 $\bar{u}$ 的峰值,纵向峰值是横向峰值的3倍左右. E_8 的潮周期变化较为复杂,合成矢量方向和潮流方向大致反向.图3表明, E 主要沿主潮沟的平均涨潮流向,纵向最大值涨潮期间为 $44 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 落潮期间为 $10.7 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 横向值相对较小,最大值涨潮期间为 $4.7 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 落潮期间为 $1.55 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$. 纵、横向变化基本同步,方向与潮流方向大致同向.涨潮总单宽瞬时悬沙输移通量大于相应落潮总单宽瞬时悬沙输移通量.表2为纵向单宽瞬时悬沙输移通量各分量的统计结果.

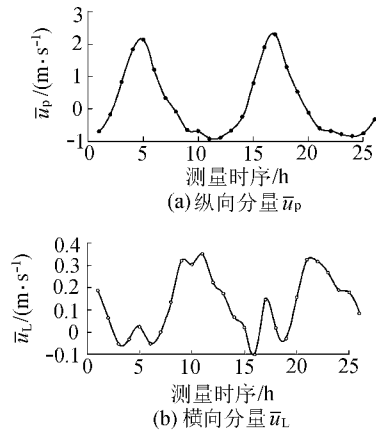


图2 $\bar{u}$ 纵横向分量的时间过程
Fig.2 Time process of longitudinal and transversal components of $\bar{u}$

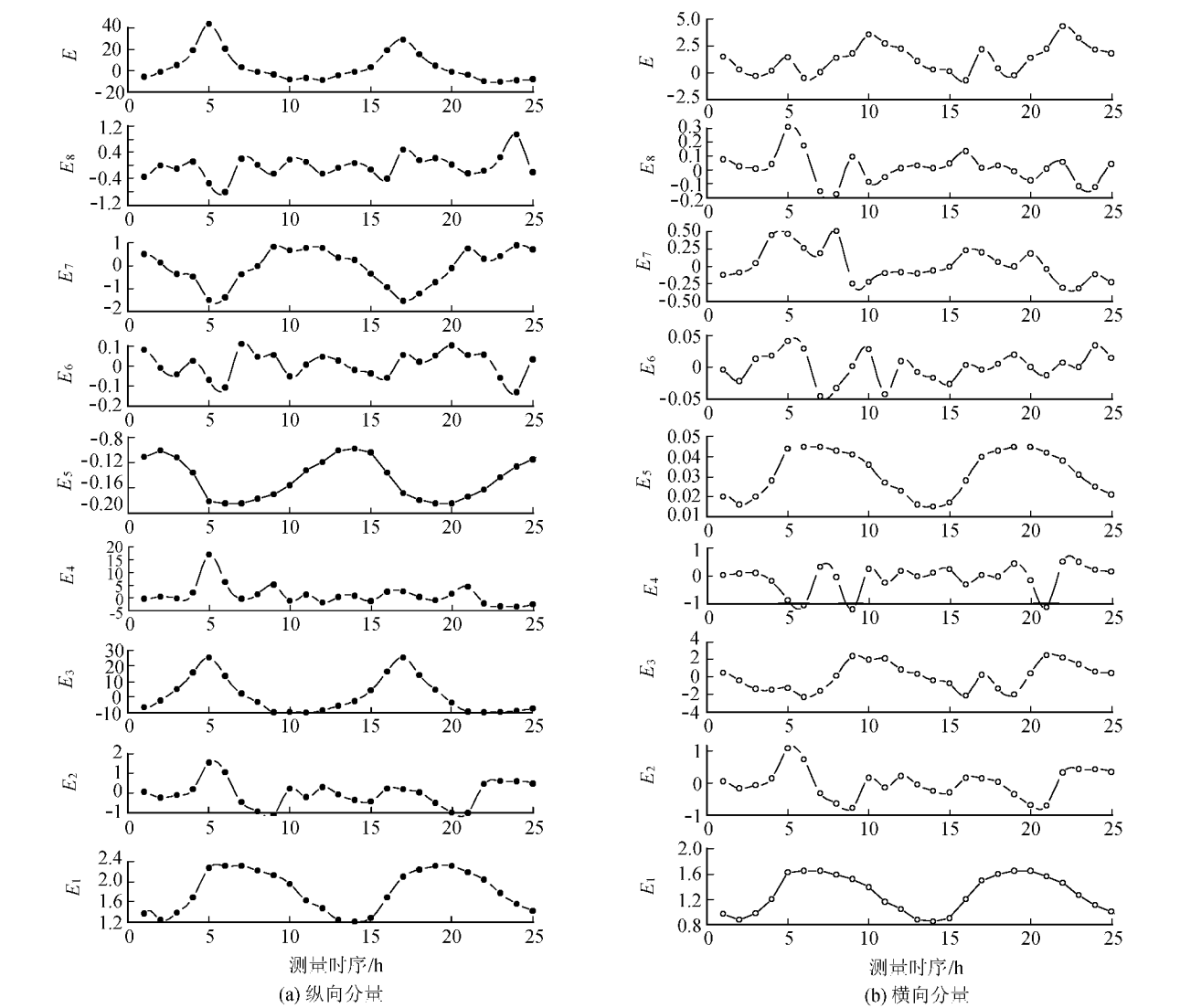


图 3 沿水道纵、横向单宽瞬时悬沙输移通量 8 个分量时间过程

Fig.3 Time processes of 8 components of suspended sediment fluxes in longitudinal and transversal directions of tidal channel

纵向单宽瞬时悬沙输移通量分量 E_1, E_3, E_4, E_6 连续 2 个潮次的统计平均值均沿平均涨潮方向,向辐射沙洲腹地输沙,各分量统计平均值以 E_1 最大, E_4 次之, E_3 较小, E_6 最小,可忽略. E_2, E_5, E_7, E_8 连续 2 个潮次的统计平均值沿平均落潮方向,各分量统计平均值以 E_5 最大, E_7 次之, E_8 较小, E_2 最小. 纵向 E 的平均值为 $3.097 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 表明沿平均涨潮方向输沙. 纵向单宽瞬时悬沙输移通量各分量潮周期内 E_3 最大值最大,其标准差达 $11.250 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,在潮周期内变化幅度较大; E_4 潮周期内最大值也较大.

表 3 为沿潮沟横向单宽瞬时悬沙输移通量 8 个分量统计结果. 横向单宽瞬时悬沙输移通量 E_1, E_3, E_5, E_7, E_8 分量在连续 2 个潮次的统计平均值沿正方向,以 E_1 潮周期统计平均值最大,其余平均值相对较小. E_2, E_4, E_6 潮周期统计平均值沿横向负方向,即大致指向西向的北尖子,其分量值相对较小, E_3 的最大值最大.

Table 2 Statistics of 8 components of suspended sediment fluxes in longitudinal direction of tidal channel

悬沙输移量	of tidal channel			$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
	最大值	平均值	标准差	
E_1	2.316	1.791	0.422	
E_2	1.549	-0.003	0.623	
E_3	25.349	0.479	11.250	
E_4	17.069	1.043	4.058	
E_5	-0.184	-0.144	0.032	
E_6	-0.132	0.004	0.064	
E_7	-1.510	-0.047	0.763	
E_8	0.922	-0.028	0.341	
E	43.738	3.097	13.519	

1.2.4 合成输移通量

图 4 为单宽瞬时悬沙输移通量利用机制分解法分解的 8 个分量 $E_1 \sim E_8$ 、总量 E 以及垂线平均流速矢量 $\bar{u}$ 的过程图图中纵坐标单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$. 与垂线平均速度矢量过程曲线比较可得:当 $\bar{u}$ 大于 0.82 m/s 时, E_2

的方向与欧拉余流方向一致;当流速较小时,其方向与欧拉余流方向相反。 E_2 反映了垂线平均含沙量对悬沙输移通量的贡献。由于欧拉余流速度较小, E_3 的方向与 $\bar{u}$ 较为一致,但并不完全相同。涨潮时, E_3 方向比 $\bar{u}$ 的方向稍右旋 $4^\circ\sim 20^\circ$;落潮时, E_3 方向比 $\bar{u}$ 的方向稍左旋 $10^\circ\sim 30^\circ$ 。由于 $\bar{u}_t$ 相对较大,对应的矢量图上可以看出 E_3 相对 $\bar{u}$ 要大些。 E_4 为潮汐震荡输移,反映潮变化量 $\bar{u}_t$ 和 $\bar{c}_t$ 相互作用的结果。当 $\bar{u}$ 小于 0.73 m/s 时, E_4 的方向和 $\bar{u}$ 的方向大致相反,方向角相差 $130^\circ\sim 210^\circ$;流速越大,方向角之差越接近 180° ;当 $\bar{u}$ 大于 0.73 m/s 时, E_4 的方向和 $\bar{u}$ 的方向较为一致。涨潮时, E_4 的方向角比 $\bar{u}$ 的方向角大 $3^\circ\sim 7^\circ$,即比速度方向稍偏右;落潮时, E_4 的方向角比 $\bar{u}$ 的方向角小 10° 左右,即比速度方向稍偏左。速度越大,方向角之差越小。 E_5 为时均量 u'_0 、 c'_0 引起的扩散,方向角为 $335^\circ\sim 340^\circ$,大小为 $0.10\sim 0.19\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,对悬沙输移通量的贡献始终指向落潮方向。 E_6 为时均量 u'_0 和潮变化量 c'_t 相互作用引起的剪切扩散,其大小和方向的变化与速度的大小和方向不相关。 E_7 为时均量 c'_0 和潮变化量 u'_t 相互作用引起的剪切扩散,与流速方向大致相反,即涨潮时剪切扩散引起的悬沙输移通量指向落潮方向;落潮时剪切扩散引起的悬沙输移通量指向涨潮方向。 E_7 的大小与流速大小有一定程度的线性相关,流速越大, E_7 相应也越大。 E_8 方向变化规律性不明显,数值较小。

表4为单宽瞬时悬沙输移通量及各分量在连续2个潮次里最大值、最小值的统计结果。 E_3 的最大值与最小值是各分量中最大的。 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_8 最大值表现为大致沿涨潮方向; E_5 、 E_6 、 E_7 最大值则大致沿落潮方向; E 最大值表现为平均涨潮方向,最小值则为平均落潮方向。

表3 沿潮沟横向单宽瞬时悬沙输移通量8个分量统计
Table 3 Statistics of 8 components of suspended sediment fluxes in transversal direction of tidal channel $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$

悬沙输移量	最大值	平均值	标准差
E_1	1.653	1.279	0.301
E_2	1.106	-0.002	0.445
E_3	2.478	0.008	1.477
E_4	-1.200	-0.082	0.476
E_5	0.045	0.031	0.011
E_6	-0.046	0	0.022
E_7	0.506	0.017	0.232
E_8	0.310	0.010	0.105
E	4.304	1.261	1.323

1.2.5 E 和垂线平均速度的对应关系

建立 E 与水深 h 及 $\bar{u}$ 的乘积 $h\bar{u}$ 的拟合关系:

$$E = 0.038 + 0.8h\bar{u} + 0.023(h\bar{u})^2 \quad R^2 = 0.92 \tag{4}$$

根据式(4)和单宽瞬时悬沙输移通量的定义,可求得东大港水道4号站位垂线平均含沙量动力表达关系:

$$C_z = 0.8 + 0.023h\bar{u} + 0.038(h\bar{u}) \tag{5}$$

同样,瞬时单宽悬沙输移通量方向角 A_E 和垂线平均流速流向 A_V 之间的拟合关系为

$$A_E = -0.412 + A_V \quad R = 1.0 \tag{6}$$

1.2.6 潮平均单宽瞬时悬沙输移通量机制分解

潮周期 T_t 平均单宽瞬时悬沙输移通量 T 的计算式^[11]为

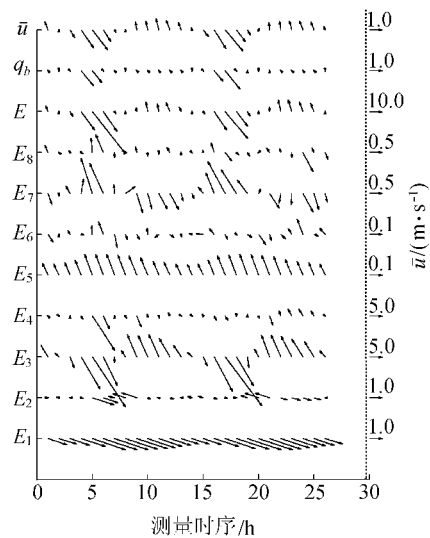


图4 单宽瞬时悬沙输移通量、各分量及线平均流速矢量过程

Fig.4 Time processes of E_1 — E_8 , E , q_b and $\bar{u}$

表4 瞬时单宽悬沙输移通量特征值
Table 4 Characteristic values of instantaneous suspended sediment flux per unit width

悬沙输移量	最小值/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	最小值 方向/ $(^\circ)$	最大值/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大值 方向/ $(^\circ)$
E_1	1.470	110	2.85	110
E_2	0.030	290	1.90	110
E_3	2.520	315	25.35	145
E_4	0.075	140	17.09	148
E_5	0.099	334	0.19	339
E_6	0.022	133	0.14	340
E_7	0.158	179	1.55	343
E_8	0.027	38	0.93	153
E	1.047	340	43.76	143

$$T = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^h u c dz dt = \underbrace{h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0}_{T_1} + \underbrace{h_t \bar{u}_t \bar{c}_0}_{T_2} + \underbrace{h_t \bar{c}_t \bar{u}_0}_{T_3} + \underbrace{h_t \bar{u}_t \bar{c}_t}_{T_4} + \underbrace{h_0 \overline{u'_0 c'_0}}_{T_5} + \underbrace{h_t \overline{u'_0 c'_t}}_{T_6} + \underbrace{h_t \overline{u'_t c'_0}}_{T_7} + \underbrace{h_t \overline{u'_t c'_t}}_{T_8}$$

式中： T_1 ——平均流引起的悬沙输移； T_2 ——潮汐与潮流的相关项，即 Stokes 漂移输移量； $T_1 + T_2$ ——拉格朗日输移； T_3 ——潮汐与含沙量潮变化相关项； T_4 ——悬沙与潮流变化相关项； $\bar{u}_t$ ——垂线平均流速的潮汐脉动； $\bar{c}_t$ ——垂线平均含沙量的潮汐脉动； h_t ——水位的潮变化量； T_5 ——垂向流速变化和含沙量变化的相关，为垂向净环流的贡献； T_6, T_7 ——时均量与潮汐振动切变引起的剪切扩散； T_8 ——垂向潮振荡切变作用。理论上， $\bar{u}_t, \bar{c}_t, h_t$ 各自潮周期平均值为零，但三者的相关产生了泥沙净输移，即潮汐捕集作用。需要指出的是：式(7)与式(2)中的 $T_1 \sim T_5$ 含义是有区别的。

表 5 潮平均纵横向各输沙项及合成悬沙输移通量统计
Table 5 Statistics of tidal-averaged sediment transport components along x-axis and y-axis and composite suspended sediment fluxes

悬沙输移量	x 轴正向输移量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	y 轴正向输移量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	合成输移通量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	合成输移方向/($^\circ$)
T_1	1.811	1.293	2.230	109.78
T_2	0.705	0.005	0.710	144.91
T_3	-0.004	-0.003	0.005	289.78
T_4	1.140	-0.086	1.095	149.78
T_5	-0.145	0.032	0.149	337.65
T_6	0.004	0	0.004	144.04
T_7	-0.066	0.023	0.070	344.41
T_8	-0.028	0.010	0.030	345.39
T	3.468	1.174	3.602	125.58

输沙率约为横向的 3 倍。比较可见，表 1 与表 5 所示的 2 种方法得到的悬沙净通量大小和方向的相应计算值是一致的，表明机制分解方法研究结果可信、可行。

2 谱分析研究

本文不考虑涨、落潮流速的方向，只利用 $\bar{u}$ 的大小进行计算，并与垂线平均含沙量 $\bar{c}$ 、临底层含沙量 C_b 及 E 的功率谱结构进行比较、分析。各量谱分析所得主要谱峰对应周期见表 6。可见， $\bar{u}$ 的大小主要体现为 11.921 h、6 h、4 h 3 种周期变化。该 3 周期分别对应全日分潮流、半日分潮流、浅水分潮流流速变化周期，以半日潮流对应谱峰较大，说明潮流主要体现为半日潮。从谱峰对应功率谱大小来看，地形地貌导致的浅水分潮的影响也较明显。垂线平均含沙量和临底层含沙量功率谱密度分布一致，说明二者具有同频的变化，这是因为水体中的悬沙主要从底床掀起、悬浮而来的，而且临底层含沙量较大，其值对垂线平均含沙量的影响较大。二者有 11.921 h、6.4 h、4 h、2.909 h 等主要谱峰对应的周期变化，显然受流速大小变化的影响，具有基本相同的周期响应。含沙量与流速的互谱和单宽瞬时输沙率功率谱分布形式基本一致，主要体现 2 种相同周期的变化，即大约为 6 h 和 4 h 的周期变化。综上所述，含沙量响应于流速的变化，同时，含沙量的周期变化还有其他动力因子的强迫。单宽瞬时悬沙输移通量体现为流速和含沙量的综合影响，但流速的影响更为明显。由于数据取样间隔为 1 h，表 6 中所得周期是近似周期。

3 结 语

本文运用悬沙输移机制分解法对东大港水道 4 号站位所在潮流水道悬沙输移的动力机制以及相应动力因子的贡献大小进行了计算和论述，初步明确了 4 号站位所在潮流水道的悬沙变化及输移机制。计算表明，悬沙净输移以平流作用占优；“潮泵效应”项在悬沙输移中也相当重要。

将潮流分解为 x 轴主潮向的纵向分量和垂直于主潮向 y 轴的横向分量，按本文公式分别计算，然后利用矢量合成法则，求出潮周期平均单宽瞬时悬沙输移分量以及合成矢量的大小、方向，见表 5。

在连续 2 个潮周期内，纵向潮 T_1, T_2, T_4, T_6 分量是沿平均涨潮方向，向辐射沙洲腹地内部输沙，以 T_1 最大， T_6 最小，可忽略； T_3, T_5, T_7, T_8 沿平均落潮方向， T_5 最大， T_3 最小。潮平均单宽瞬时悬沙输移通量纵向分量为 $3.468 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ，表明纵向分量沿涨潮方向向内输沙。在连续 2 个潮周期内，横向潮 T_3, T_4 分量沿负方向大致西向，其余分量则指向东沙方向。横向 T_1 最大，其余项均较小，可见横向净输沙主要体现为平均流输沙。纵向悬沙净

表 6 东大港水道 4 号站位各变化量
频谱 4 个主要谱峰对应周期值

Table 6 Period values corresponding to four main spectral peaks on frequency spectrum of each variable

谱分析量	周期 T/h			
	1	2	3	4
$\bar{u}$	11.921	6	4	
$\bar{c}$	11.921	6.4	4	2.909
C_b	11.921	6.4	4	2.909
E	12.329	6	4	2.909
$\bar{u} \sim \bar{c}$	14.938	6	4	2.797

运用功率谱分析方法对垂线平均流速、垂线平均含沙量、临底层含沙量、单宽瞬时悬沙输移率及相互间的关系进行探讨,表明潮流流速是水体含沙量变化及悬沙输移的主要动力因素.运用功率谱分析方法得出有关悬沙输移各量的频谱及对应关系,给出了相关周期值.

数据时间序列长度和测量精度无疑是本文研究方法的关键之处.考虑诸如波浪、风速等动力因素,再利用小波分析等方法进行综合研究,研究结果可能更加深化明确.

参考文献:

- [1] 沈焕庭. 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 1-41.
- [2] JAY D A, GEYER W R, UNCLES R J, et al. A review of recent development in estuarine scalar flux estimation[J]. *Estuaries*, 1997, 20(2): 262-280.
- [3] BOWDEN K F. The mixing processes in a tidal estuary[J]. *International Journal of Air and Water Pollution*, 1965, 7: 343-356.
- [4] FISHER H B. Mixing and dispersion in estuaries[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1976, 8: 107-133.
- [5] DYER K R. The balance in stratified estuaries[J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1974, 2: 273-281.
- [6] UNCLES R J, ELLIOTT R C A, WESTON S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary[J]. *Estuaries*, 1985, 8: 256-269.
- [7] 万新宁, 李九发, 何青, 等. 国内外河口悬沙通量研究进展[J]. *地球科学*, 2002, 17(6): 864-870.
- [8] 时伟荣. 长江口浑浊带含沙量的潮流变化及其成因分析[J]. *地理学报*, 1993, 48(5): 412-420.
- [9] 时伟荣, 李九发. 长江河口南北槽输沙机制及浑浊带发育分析[J]. *海洋通报*, 1993, 12(4): 69-76.
- [10] 宋立松, 余祈文. 杭州湾悬沙净输移机制探讨[J]. *泥沙研究*, 2003, 28(3): 47-52.
- [11] 贺松林, 孙介民. 长江河口最大浑浊带的悬沙输移特征[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(1): 60-66.
- [12] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 100-101.

Mechanism of suspended sediment transport in Dongdagang tidal channel of radial sand ridges

WU De-an^{1, 2}, ZHANG Ren-shun³, YAN Yi-xin^{1, 2}, LI Rui-jie^{1, 2}

(1. College of Traffic, College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Ocean and Mudflat Institute, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract Based on water and sediment data for station No.4 of Dongdagang tidal channel, a discussion was made on the mechanism of suspended sediment transport in the channel by use of the mechanism decomposition method and spectral analysis method. The result shows that the advection is the main factor to affect the suspended sediment transport, and the tidal pumping effect also plays an important role. Meanwhile, the current velocity is an important dynamic factor on variation of sediment concentration in water body and suspended sediment transport.

Key words radial sand ridge; tidal channel; mechanism decomposition; spectral analysis