第 18 卷 第 2 期 2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0162-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018

引用格式:郝林杰, 邵宇阳, 童朝锋. 长江口北槽悬沙输移机理分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 162—168
Hao Linjie, Shao Yuyang, Tong Chaofeng. Mechanism of suspended sediment transport in the north passage of the Yangtze River estuary[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 162—168

水利工程

长江口北槽悬沙输移机理分析

郝林杰 邵宇阳* 童朝锋
(河海大学港口海岸与近海工程学院,南京 210098)

摘 要 运用通量机制分解法对长江口北槽深水航道的实测水文泥沙资料进行了分析,将悬沙通量分解成了 8 个动力项,从平流输沙、潮泵效应输沙和垂向净环流输沙三方面综合分析了长江口北槽的悬沙输移特征。研究结果表明:在水文资料实测年份时,北槽输沙主要来源于上游来沙;平流输沙项占总体净输沙的比重最大;潮泵输沙所占比例较小;航道内的各测点的垂向净环流输沙主要受欧拉余流控制;深水区悬沙含量垂向变化明显,河口浅水区,表底余流方向不同,垂向净环流输沙作用增强。

关键词 通量机制分解法 悬沙输移 长江口北槽
中图法分类号 TV148; **文献标志码** A

河口悬沙通量问题是国际地圈-生物圈计划(IGBP)中的两个核心计划——海岸带陆海相互作用(LOICZ)和全球海洋通量联合研究(JGOFS)的中心议题之一[1]。国内外的许多学者对此已经展开了广泛的研究,主要采用的方法有模型研究[2]、水文学方法[3]和机制分解[4—8]等,通量机制分解法能直接确定影响通量变化的各种因素、相互作用及其贡献大小,是目前通量计算研究中较为成熟和可靠的方法。童朝锋等[9]、Bowden 和万新宁等[9—11]建立起的悬沙断面输移计算公式,在近些年的河口海岸水沙输运的研究中,得到了不断的应用与发展。长江口北槽内的深水航道整治工程是我国水运交通行业关注的热点,目前深水航道内的泥沙回淤是所遇到需要解决的最主要问题。本文运用通量机制分解法来分析长江口深水航道北槽的悬沙通量的输移机理,选择长江口深水航道建设具有代表性的时刻(一期工程竣工)的实测水文资料,分析长江口深水航道北槽的悬沙输移特征,试图从另一角度为长江口深水航道北槽的有效维护以及整治工程的完善提供一些科学思路与参考。

2017 年 4 月 20 日收到 国家自然科学基金重点项目(51339005)和国家自然科学基金青年项目(51409081)资助
第一作者简介:郝林杰(1994—),男,硕士研究生。研究方向:河口海岸动力学。
* 通信作者简介:邵宇阳(1980—),男,博士,讲师。研究方向:河口海岸动力学。E-mail: syy@hhu.edu.cn。

1 研究区域概况及资料来源

1.1 研究区域概况

长江口地处中国东南沿海,是我国最大的出海口。长江口共有四条入海水道,北槽是其中最晚形成的河道,约形成于 1954 年。其拦门沙滩顶自然水深多年稳定在 6 m 左右。于 1984 年,将北槽开辟为进出长江口的主航道,年疏浚维护量约 1 200 万 m^3,维护水深 7 m,底宽 250 m。北槽航道的潮汐为半日潮,多年平均潮差约为 2.61 m。因长江径流的下泄,使北槽航道中,落潮流速大于涨潮流速,落潮历时略长于涨潮历时。洪季大潮时,表层最大落急流速可达 3 m/s[13]。

1.2 资料来源

采用长江口水文水资源勘测局于 2002 年 8 月 10 ~ 11 日大潮期间在 9 个测验垂线点的实测水文泥沙资料来开展研究,测点分布如表 1 所示。定点测验采用 LS—25、ZSX—Ⅲ型直读式流速流向仪进行流速流向测验、动船测验采用 RD—DR0300、RD—DR0600 型 ADCP 进行流速流向测验、定位和导航采用 Astech GPS 信标接收机。悬移质取样采用2 000 mL横式采样器。垂线流速测量采用往返法双程施测。当水深 > 3 m 时,采用 6 点法,水深 ≤3 m时用 3 点法,施测的时间间隔为 1 h。流向观读,每个测点均在测速前、后各测读一次,取二次平均值作为该点流向。悬移质沙样的测取按照测流必

表 1 水文测验各点位置坐标表

Table 1 The coordinates of every hydrological observation points

垂线号	坐标		经纬度		备注
	X	Y	东经	北纬	
CB1	3 464 300	41 383 449	121°46′33.29″	31°17′39.08″	北槽分流比上断面上
CS0	3 462 361	41 387 928	121°49′23.39″	31°16′37.72″	北槽上段与横沙通道水流交汇处附近
CS1	3 461 515	41 393 391	121°52′50.20″	31°16′12.10″	—
CB2	3 459 855	41 395 725	121°54′19. 03″	31°15′18.98″	北槽分流比下断面上
CS2	3 459 575	41 402 475	121°58′34.20″	31°15′11.99″	—
CSW	3 457 737	41 412 672	122°05′0.11″	31°14′15.23″	北槽内河道转弯附近点
CS3	3 452 588	41 417 988	122°08′22.48″	31°11′29.45″	—
CS4	3 446 203	41 429 391	122°15′34.74″	31°08′04.83″	—
CS5	3 443 190	41 441 469	122°23′11.25″	31°06′29.40″	—

取沙的原则进行,本次所用悬移质采样器为 2 000 mL 横式采样器。

2 研究方法

本文采用相对水深对瞬时物质输移量进行分解。先计算出在 1 个潮周期内每个测点的涨潮平均流向,将其作为之后分解计算的纵向正方向,并将沿顺时针方向旋转 90°的方向作为横向正向,将实测流速数据沿横纵两正方向进行分解,即分别作其在横纵两个正方向上的投影。

在将瞬时流速分解到两个正方向上之后,计算出各测点瞬时流速在横(纵)方向上的垂向平均值,将各测点的瞬时流速分解为垂向平均值与其偏差项之和,即

$$u(z,t) = \bar{u} + u' \tag{1}$$

式(1)中, $u(z,t)$ 为各测点瞬时流速值; $\bar{u}$ 为一条垂线上各测点流速的平均值, u' 为各测点与垂向平均值的偏差项。

再将垂向平均值 $\bar{u}$ 和偏差项 u' 分解为潮平均量和潮变化量之和:

$$\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_t \tag{2}$$

$$u' = u'_0 + u'_t \tag{3}$$

式中, $\bar{u}_0$ 为一个潮周期内各垂线垂向平均值的潮平均值; $\bar{u}_t$ 为各测点垂向平均值与潮平均值的变化量; u'_0 为各测点垂向平均值偏差项在一个潮周期内的平均值; u'_t 为各测点垂向平均值偏差项与潮周期偏差项平均值的变化量。所以,

$$u(z,t) = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u'_0 + u'_t \tag{4}$$

按照上述方法,将各测点瞬时悬沙含沙量记为

$$c(z,t) = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c'_0 + c'_t \tag{5}$$

式(5)中, $c(z,t)$ 为各测点瞬时含沙量; $\bar{c}_0$ 为一个潮周期内各垂线含沙量垂向平均值的潮平均值; $\bar{c}_t$ 为各测点垂向平均值与潮平均值的变化量; c'_0 为各测点垂向平均值偏差项在一个潮周期内的平均值; c'_t 为各测点垂向平均值偏差项与潮周期偏差项平均值的变化量。

各测点水深可分解为潮平均量与潮变化项之和,即考虑了潮震荡对水深变化的影响:

$$h = h_0 + h_t \tag{6}$$

式(6)中, h 为各测线的瞬时水深; h_0 为各侧线水深在一个潮周期内的平均值; h_t 为瞬时水深与潮平均值的变化量。

则在一个悬沙潮周期 T_t 内,平均瞬时单宽悬沙输移通量 T 的计算式为

$$\begin{aligned} T = \frac{1}{T_t}\int_0^{T_t}\int_0^1 huc\,\mathrm{d}z\mathrm{d}t &= h_0\bar{u}_0\bar{c}_0 + \langle h_t\bar{u}_t\rangle\bar{c}_0 + \\ &\langle h_t\bar{c}_t\rangle\bar{u}_0 + \langle h_t\bar{u}_t\bar{c}_t\rangle + h_0\,u'_0\bar{c}'_0 + \\ &\langle h_t u'_0 c'_t\rangle + \langle h_t u'_t c'_0\rangle + \langle h_t u'_t c'_t\rangle \end{aligned} \tag{7}$$

式(7)中,< >表示为潮平均值(下同)。现将等式中各项依次记为 $T_1 \sim T_8$ 。其中, T_1 代表平均流引起的悬沙输移, T_2 为斯托克斯漂移输移量, $T_1 + T_2$ 组成平流输移项; T_3 表示潮汐与含沙量关系的潮变化相关项, T_4 表示悬沙与潮流场的变化相关项, T_3 和 T_4 共同组成"潮泵作用"输移项,理论上, $\bar{u}_t$、$\bar{c}_t$、h_t 在各自潮周期内平均值为零,但三者的相关联产生了泥沙净输移; T_5 表示垂向流速与含沙量变化的相关项,为垂向径环流的贡献; T_6 、T_7 表示时均量与潮汐振动切变引起的剪切扩散; T_8 为垂向潮振荡切变作用。

单宽输水量为

$$\langle Q\rangle = \langle U_0 + U_t\rangle h_0 \tag{8}$$

取一阶近似:

$$U_L = \langle U_0 + U_t\rangle \tag{9}$$

式中, $U_0 = \bar{u}_0$ 称为垂向平均欧拉余流,是由风海流、密度流、径流和潮汐余流等因素控制的水体净输移方向; $U_t = \langle h_t\bar{u}_t\rangle / h_0$ 为斯托克斯漂流,其直

接体现水位变化量与水流变化量的相关性; U_L 称为拉格朗日余流，指的是1个或多个潮周期时段内对流体微团的水体速度的平均。[6—9]

3 输沙悬移计算结果

根据实测资料,运用式(1)~式(9),对潮周期平均单宽净输移量 T 及各输沙项进行计算,图1为各测点潮周期平均单宽悬沙输移净通量 T 的示意图(箭头指向为潮周期平均输沙量的方向,长度代表各测点输沙量的比例关系)。表2为8个动力项在潮周期的平均输沙量、角度与占总输沙量(各输沙项的矢量和)的比例(矢量模之比)。表3为各测点潮流情况、水深数据、余流数值、含沙量的特征值。

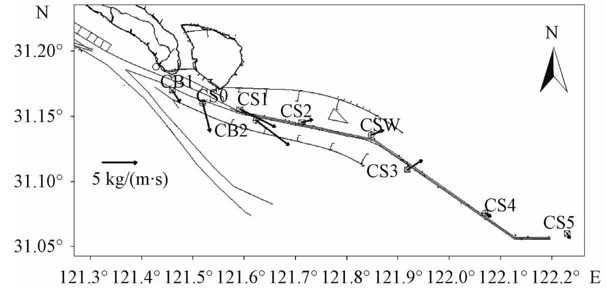

图1 潮周期平均单宽悬沙输移净通量

Fig. 1 Tidal-averaged suspended sediment flux per unit width

由图1和表2、表3可知,影响悬沙输移的主要项有 T_1、T_2 和 T_5 三项,其他项所占比重较小。从时间上看,落潮流速、历时均大于涨潮期;从空间上看,CS3测线处含沙量最大,显著高于其他各测点,所以在计算结果中CS3处各项输沙项也明显大于其余各测点,净输沙方向沿东北方向朝向航道北岸,矢量合成的净输沙量较小;在航道内各测点中,CB1、CS0、CS1、CB2输沙方向均指向航道凸岸,向航道南侧淤积,净输沙量相对较大;CS2、CSW净输沙方向沿东北方向向河道北岸淤积,T 值也较小;外海CS5点,净输沙量最小,输沙方向向东;航道口CS4点输沙量较小,沿西南方向向河口外部输运。

4 悬沙输移机理分析

4.1 平流输沙

平流输沙项是欧拉余流和斯托克斯余流对悬沙输移的综合作用,由 T_1 和 T_2 项组成,T_1 方向与欧拉余流方向、T_2 的方向和斯托克斯余流方向一致,大小不仅和余流值有关,同时也和水深及大潮平均含沙量线性相关。

T_1 代表了优势流对于净输沙量的作用大小,由涨落潮强度对比决定,涨落潮历时与流速的差异决定了 T_1 的方向与大小。如图2所示,航道内各测点均沿落潮方向输移,表明下泄径流对悬沙输移有重要影响。T_2 的输移方向如图2所示,从总体上看,与 T_1 输移方向相反。

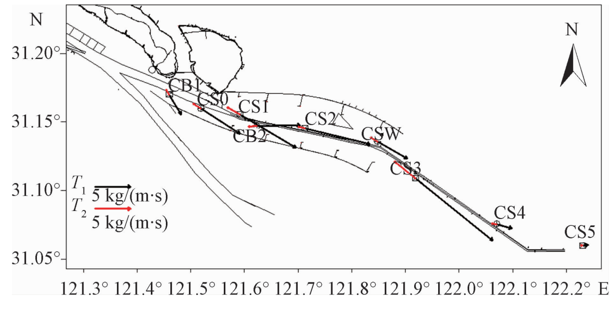

图2 各测点 T_1 和 T_2 输沙量及输沙方向

Fig. 2 Flux and direction of T_1 and T_2 at gauge stations

航道内各测点的输沙方向基本与落潮方向一致,说明落潮流对输沙项的贡献较大,在航道内,各测点落潮流速均大于涨潮流速,落潮流为优势流,对输沙的贡献要大于张潮流。在CS3测点的潮周期平均含沙量最高,CS3处输沙项的值也最大。CB1处受到了横沙岛与长兴岛之间的水道影响,对输沙方向产生了一些影响。

T_2(斯托克斯输沙项)表明了潮汐与潮流的相关性,其大小与潮平均含沙量线性相关。其值与水深也有一定关系,在深水区,T_2 值一般较小,而在浅水区,波浪的非线性作用增强,T_2 的影响会随之增大。

从表2可知,T_1、T_2 两项在输沙各项中所占比例最大,平流输沙项对悬移净输沙贡献显著。T_1 较 T_2 高一个数量级以上,T_1 占首要影响。

4.2 潮泵效应输沙

在一个潮周期尺度内,由于涨潮与落潮的挟沙强度不同,导致底部泥沙在交换的过程中产生了不对称输移,并且因为滞后效应,即流速变化与悬沙浓度变化的时间过程存有一定的相位差,使得涨落潮的输沙无法完全抵消,产生了净输沙量,称之为潮泵输沙。其主要取决于,一个潮周期内的潮流与含沙量的不对称变化,同时也与背景含沙量相关。从总体上来看,T_3 要小于 T_4,潮流流速的变化会影响到悬沙浓度的变化。CS3测点 T_3 与 T_4 的比重要远大于其余各测点,这是由于CS3测点水位最低,背景含沙量最高。取浅水区的CB2、CS3、CS4进行分析,其 T_3+T_4 占比较大,由于中下层水体含沙量易受水流动力影响,故作CS2、CS3、CS4处的底层流速的纵向分量与底层含沙量的对应关系图(图3)。由图3可知,CS3测点处,在一个周期内,底层泥沙出现两次再悬浮,流速与含沙量过程线相位相似,最大含沙

表 2　各动力项潮周期角度、各平均输沙量及其占总输沙量之比

Table 2　Tidal-averaged suspended sediment flux, direction and proportion of each dynamic term

测站	输沙项参数	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T	T_1+T_2	T_3+T_4
CB1	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	3.214 3	0.426 9	0.078 5	0.232 7	0.828 2	0.046 0	0.212 6	0.089 3	2.056 9	3.624 8	0.246 5
	角度/(°)	148.776 3	325.001 2	141.923 2	319.410 5	335.734 6	334.287 6	135.838 2	175.108 8	147.213 1	246.218 0	282.307 3
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	159.15	21.13	3.89	11.52	41.01	2.28	10.53	4.42		176.23	11.99
CB2	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	6.043 6	0.582 5	0.122 0	0.114 7	3.568 9	0.121 1	0.278 7	0.004 7	6.046 1	5.857 6	0.211 3
	角度/(°)	89.175 3	269.445 8	107.000 9	271.298 7	193.823 7	192.141 6	102.357 7	169.012 4	126.542 4	64.049 2	36.585 7
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	112.11	10.81	2.26	2.13	66.20	2.25	5.17	0.09		96.88	3.49
CS0	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	6.504 2	0.638 7	0.171 4	0.258 1	4.116 9	0.125 1	0.507 0	0.024 2	4.268 2	5.880 1	0.098 8
	角度/(°)	122.923 1	302.197 8	122.399 7	301.244 6	260.751 9	252.836 4	120.101 8	206.643 7	165.230 8	201.716 3	317.177 9
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	213.98	21.01	5.64	8.49	135.44	4.12	16.68	0.79		137.77	2.31
CS1	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	9.097 1	1.017 7	0.111 0	0.212 6	2.825 7	0.010 1	0.635 0	0.072 3	5.828 1	8.104 3	0.314 2
	角度/(°)	121.119 7	300.399 2	123.470 3	298.891 2	308.504 2	319.691 4	112.247 5	192.721 6	117.478 3	98.155 1	215.098 8
	各输沙项占总输沙量的百分比(%)	156.12	17.47	1.90	3.65	48.49	0.17	10.90	1.24		139.06	5.39
CS2	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	9.399 9	0.943 0	0.136 6	0.287 5	7.010 4	0.062 6	0.200 7	0.074 6	1.635 1	9.796 1	0.223 3
	角度/(°)	103.615 5	284.645 6	106.617 1	284.831 2	288.613 8	272.782 0	85.922 4	14.027 8	76.291 8	171.620 0	92.096 7
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	651.72	65.38	9.47	19.93	486.04	4.34	13.92	5.17		599.11	13.66
CS3	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	13.911 1	1.663 9	0.583 1	0.086 4	12.018 5	0.454 4	0.511 9	0.183 4	2.529 7	12.407 0	0.502 6
	角度/(°)	129.355 7	308.010 9	309.090 9	318.170 4	322.150 9	143.067 5	122.209 2	232.162 7	57.024 8	214.641 0	72.937 8
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	1 654.03	197.84	69.33	10.27	1 429.00	54.02	60.87	21.80		490.45	19.87
CS4	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	2.174 2	0.366 7	0.120 2	0.035 5	1.279 7	0.108 1	0.495 3	0.217 3	0.980 9	2.412 8	0.128 7
	角度/(°)	105.829 5	276.400 0	295.192 8	290.378 1	269.857 5	92.886 7	120.377 1	355.727 7	122.778 7	310.550 8	9.214 4
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	224.88	37.93	12.43	3.67	132.36	11.18	51.23	22.48		245.97	13.12
CS5	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	0.747 8	0.120 0	0.028 6	0.026 4	0.753 5	0.025 5	0.147 0	0.055 9	0.813 1	0.842 9	0.053 5
	角度/(°)	85.526 5	267.036 1	262.703 0	98.865 6	200.011 0	23.024 0	100.447 7	269.208 6	145.187 2	215.029 8	278.737 6
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	141.94	22.78	5.43	5.01	143.03	4.84	27.90	10.61		103.67	6.57
CSW	各输沙项输沙量/[kg·(m·s)$^{-1}$]	4.798 1	0.565 5	0.004 2	0.114 5	3.665 7	0.021 2	0.469 3	0.072 4	1.917 5	4.829 7	0.118 2
	角度/(°)	119.890 2	300.528 9	356.409 5	299.404 1	322.541 9	306.379 5	119.360 2	96.299 3	70.471 8	22.478 9	235.485 6
	各输沙项占总输沙量的百分比/%	371.64	43.80	0.32	8.87	283.93	1.65	36.35	5.60		251.88	6.17

表 3　各测点潮流、水深、余流和含沙量特征值

Table 3　Characteristic values of tidal current, water depth, residual currents and sediment concentration

测站	潮流	平均流向/(°)	流速/(m·s^{-1})	历时/h	潮周期平均水深/m	流速与流向	欧拉余流	斯托克斯漂流	拉格朗日余流	潮平均含沙量/(m·s^{-3})
CB1	涨潮	319	0.262 64	9	9.19	流速/(m·s^{-1})	0.688	0.089	0.600	0.536
	落潮	117	1.190 53	16		流向/(°)	158	332	159	
CB2	涨潮	286	0.210 64	9	10.47	流速/(m·s^{-1})	0.888	0.085	0.802	0.699
	落潮	124	1.470 00	16		流向/(°)	76	256	76	
CS0	涨潮	303	0.235 45	9	12.67	流速/(m·s^{-1})	0.781	0.076	0.705	0.661
	落潮	115	1.333 35	16		流向/(°)	127	305	128	
CS1	涨潮	287	0.162 50	10	11.70	流速/(m·s^{-1})	0.867	0.096	0.771	0.915
	落潮	106	1.577 42	15		流向/(°)	129	307	129	
CS2	涨潮	278	0.308 33	10	9.61	流速/(m·s^{-1})	0.805	0.081	0.724	1.217
	落潮	106	1.536 68	15		流向/(°)	101	285	101	
CS3	涨潮	320	0.405 45	9	7.99	流速/(m·s^{-1})	0.921	0.109	0.812	1.902
	落潮	129	1.536 00	16		流向/(°)	135	309	135	
CS4	涨潮	278	0.484 67	12	9.52	流速/(m·s^{-1})	0.459	0.087	0.378	0.511
	落潮	133	1.300 62	13		流向/(°)	97	259	102	
CS5	涨潮	258	0.450 00	13	11.33	流速/(m·s^{-1})	0.280	0.043	0.237	0.272
	落潮	131	0.918 00	12		流向/(°)	64	248	63	
CSW	涨潮	302	0.372 86	12	9.07	流速/(m·s^{-1})	0.603	0.071	0.531	0.882
	落潮	111	1.349 88	13		流向/(°)	124	306	124	

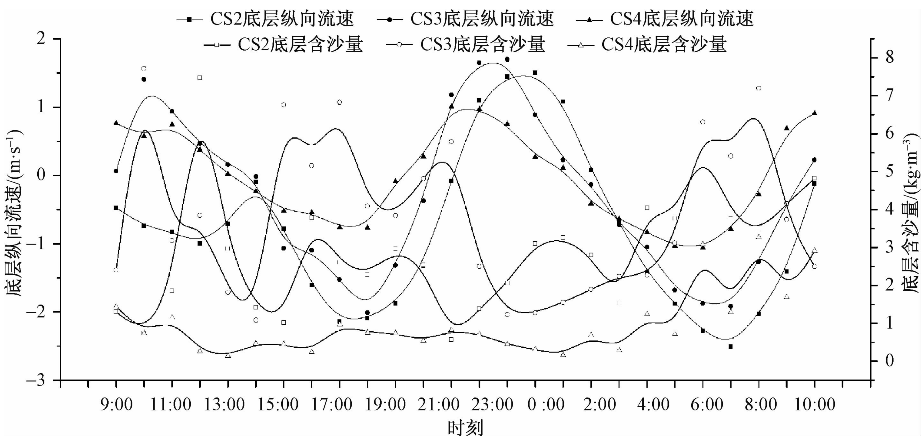

图 3　CS2、CS3、CS4 站纵向底层流速和底层含沙量过程线

Fig. 3　Phase relationships between velocities and sediment concentrations at bottom along longitudinal direction at CS2, CS3 and CS4 gauge station

量出现在落急时刻附近，这是由于，经过涨憩，泥沙普遍沉降，含沙量处于低点，且落潮流含沙量较低，含沙量峰值由本地再悬浮决定，在整个落潮时间，悬沙浓度都维持在较高水平，涨潮期间，底沙再悬浮量要明显的小于落潮期间，涨潮底层含沙量峰值出现在涨潮初期。由于涨潮平均流速较大，冲刷作用较强，产生沿落潮方向的不对称输沙，但在 CS3 测点处潮泵净输沙方向为涨潮方向，即向河内输沙量大于向河口输沙量，其可能原因是，在 CS3 处，T_3、T_4 的值受到水深影响较大，涨潮时水深较大，所以潮泵净输沙方向为涨潮方向。

在 CS2 测点处，含沙量维持在较低水平，涨潮时含沙量低于落潮时，落潮含沙量峰值出现在落急时刻，涨潮最大含沙量滞后涨急 1 ~ 2 h，这是由于涨潮含沙量与表层泥沙沉降与含有较高含沙量的涨潮流有关。

4.3　垂向净环流输沙

由于含沙量的不均匀分布，与在垂向各层中余流的方向与强度不一致，使得在一个潮周期内，各层输沙量不能相互抵消，产生了垂向净环流输沙。作各测点的垂向余流结构图，来表示垂向余流的强弱。

在垂向各层中，欧拉余流的大小与方向代表了各层的优势流的大小与输移方向。在 CB1、CB2、CS0、CS1、CS2、CS3 测点中，垂向各层余流方向一致，

周期性潮动力为主要作用力,落潮向动力因素占据主导地位,在余流结构图图 4 上,体现为欧拉余流从表至底逐渐减少;CS4、CSW 测点因径流、风海流等动力因素与潮流的剧烈作用,形成错位均势,在垂向各层中余流方向不同,在表层径流的动力因素占优,沿落潮方向,中下层余流沿涨潮方向,所以,在测点处存在有明显的余环流;斯托克斯余流在各层变化不大,方向一致,且在 CS5 测点处,斯托克斯漂流占据主导地位,远大于欧拉余流,起控制作用;拉格朗日余流更直观的表现出了悬沙净输运的趋势,CB1、CB2、CS0、CS1、CS2、CS3 测点处各层方向基本一致,而 CS4、CS5、CSW 处欧拉余流与斯托克斯余流叠加后,各层方向不一致,表层余流沿落潮方向,底层余流呈相反态势。

表 4 为各测点垂向各层潮平均含沙量的值,在表中本文用表层/底层含沙量的比值作为判断各测点垂向各层悬沙混合程度的特征值,比值越大,混合程度越均匀。由表可知,处于河口浅水区的 CS4 测点处比值较大,这是由于河口浅水区的潮流与径流的强烈的相互作用,使得悬沙各层混合较为均匀;CB1 测点处两股径流相汇聚,在两股径流与潮流的作用下,各层悬沙混合最为均匀;而深水区的各测点,远离河口,受径流输移的泥沙受到的影响小,水深较大,底层泥沙较难被掀起到表层,使得整体含沙量低,又由于水动力作用较弱,泥沙垂向混合作用也较弱,上层泥沙易向下沉底,使得含沙量垂向变化明显。

5　结语

本文运用通量机制分解法,通过对具有代表性的实测水文资料进行计算分析,基于本文资料得到了长江口北槽泥沙输运机制的以下结论。

(1)平流输沙项占总体净输沙的比重最大,其中深水区平流输沙主要由 T_1 项组成,浅水区平流输沙 T_2 项的影响增强。

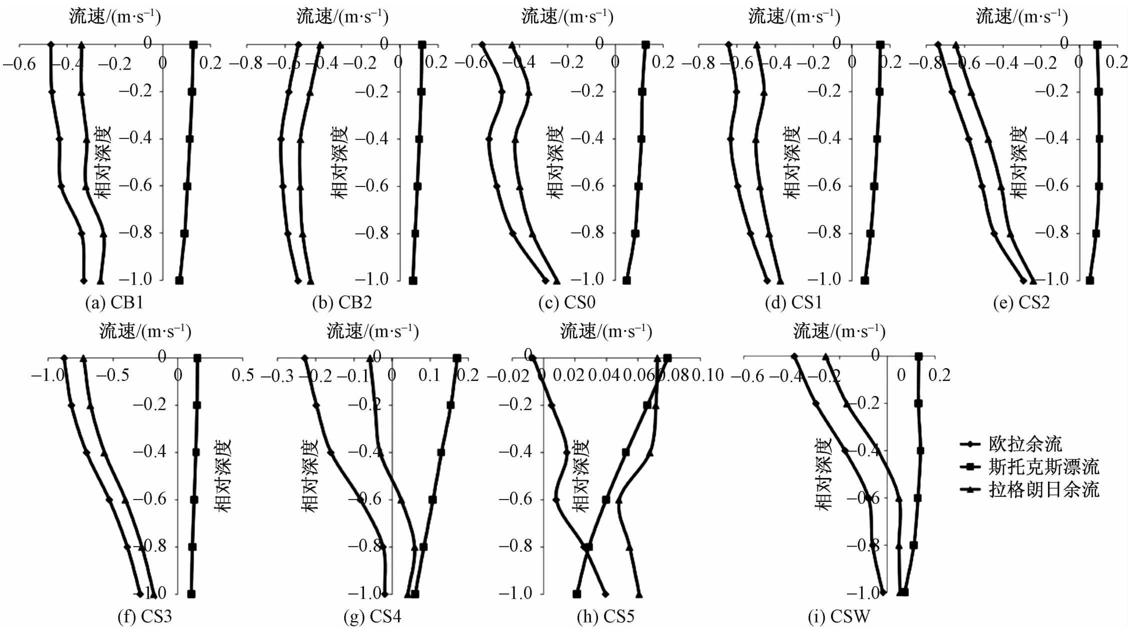

图 4　各测点垂向余流结构图

Fig. 4　Vertical residual current structures at gauge stations

表 4　垂向各层含沙量均值

Table 4　Vertical distribution of tidal-averaged suspended sediment concentration

测站	表层	含沙量/(kg·m^{-3}) 0.2H	0.4H	0.6H	0.8H	底层	表层:底层/%
CB1	0.294 8	0.301 1	0.377 0	0.477 5	0.642 0	1.121 9	26.28
CB2	0.298 6	0.403 3	0.513 8	0.638 5	0.870 9	1.468 7	20.33
CS0	0.203 9	0.317 3	0.375 8	0.497 6	0.732 0	1.359 8	14.99
CS1	0.295 9	0.386 1	0.453 3	0.597 7	0.921 8	1.644 2	17.99
CS2	0.362 5	0.509 6	0.678 0	0.882 0	1.359 8	2.303 0	15.74
CS3	0.666 7	1.029 8	1.433 5	1.933 5	2.651 2	3.924 1	16.99
CS4	0.318 8	0.346 3	0.523 6	0.678 0	1.476 6	1.589 9	20.05
CS5	0.090 5	0.141 5	0.206 9	0.306 5	0.466 6	0.822 0	11.00
CSW	0.274 6	0.467 5	0.646 7	0.889 8	1.114 7	1.900 6	14.45

注:H 表示测站水深。

(2)潮泵输沙所占比例较小,涨落潮背景含沙量与再悬浮是影响潮含沙量过程线不对称的主要原因,并因此产生了净潮泵输沙。

(3)垂向净环流输沙与悬沙垂向密度梯度和拉格朗日余环流的强弱有关,位于航道内的各测点余流方向基本一致,主要受欧拉余流控制,深水区悬沙含量垂向变化明显;河口浅水区,表底余流方向不同,垂向净环流输沙作用变强。

(4)长江口北槽泥沙有向航道两岸淤积的趋势,外海泥沙对淤积的贡献不大,泥沙淤积主要来自于径流带来的上游来沙。

(5)长江口北槽深水航道的泥沙问题十分复杂,本文是根据典型水文年份的资料提出了一种分析思路,今后为了更好地了解长江口深水航道的泥沙输运机制,还需要对更多相关资料进一步分析。

参 考 文 献

1 Holligan P M, de Boois H. Land-ocean interactions in the coastal zone (LOICZ), science plan. Global Change Report,1993;25:1—150

2 窦国仁. 河口海岸泥沙数学模型研究. 中国科学(A 辑), 1995;25(9):995—1 001
Dou Guoren. NumericaI modeIing of the sediment in the estuary and coastaI zones. Science of China(A),1995;25(9):995—1001

3 WaIsh J P,Nittrouer C A. Observations of sediment flux to the EEI continental shelf,North California . Marine Geology,1999;154:55—68

4 陈建勇,戴志军,陈吉余,等. 杭州湾北岸弧形岸段悬沙净输移分析——以龙泉—南竹港岸段为例. 泥沙研究,2009;(2):53—59
Chen Jianyong, Dai Zhijun,Chen Jiyu, *et al.* Analysis of the net sediment transportation along arc-shaped coast in the northern bank, Hangzhou bay—a case study of Longquan-Nanzhu harbor segment. Journal of Sediment Research, 2009;(2):53—59

5 杨晓东,姚炎明,蒋国俊,等. 乐清湾悬沙输移机制分析. 海洋通报,2011;30(1):53—59
Yang Xiaodong, Yao Yanming, Jiang Guojun, *et al.* Study on the transport mechanism of suspended sediment in Yueqing bay. Marine Science Bulletin,2011;30(1):53—59

6 胡日军. 舟山群岛海域泥沙运移及动力机制分析. 青岛:中国海洋大学,2009
Hu Rijun. Sediment transport and dynamic mechanism in the Zhoushan archipelago waters,Qingdao:Ocean University of China,2009

7 冯凌旋,李占海,李九发,等. 基于机制分解法长江口南汇潮滩悬移质泥沙通量研究. 长江流域资源与环境, 2011; 20 (8): 944—950
Feng Lingxuan, Li Zhanhai, Li Jiufa, *et al.* Flux of suspended sediment in the Nanhui tidal flat of the Yangtze estuary with mechanism decomposition method. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011;20(8): 944—950

8 童朝锋,郑联枭,孟艳秋,等. 兴化湾悬沙输移机理分析. 水利水运工程学报,2016;(2):1—10
Tong Chaofeng, Zheng Lianxiao, Meng Yanqiu, *et al.* Mechanism of suspended sediment transport in Xinghua bay. Hydro-Science and Engineering, 2016;(2):1—10

9 万新宁,李九发,何 青,等. 国内外河口悬沙通量研究进展. 地球科学展,2002;17(6):864—870
Wan Xinning, Li Jiufa, He Qing, *et al.* Review of suspended sediment flux in the world. Advance in Earth Sciences, 2002; 17 (6): 864—870

10 Bowden K F. The mixing processes in a tidal estuary . International Journal of Air and Water Pollution,1965;(7):343—356

11 Fisher H B. Mixing and dispersion in estuaries. Annual Review of Fluid Mechanics,1976;(8):107—133

12 Uncles R J, Elliott R C A, Weston S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary. Estuaries, 1985; (8): 256—269

13 刘 杰,徐志杨,赵德招,等. 长江口深水航道(一、二期工程)回淤变化. 泥沙研究,2009;(2):22—28
Liu Jie, Xü Zhiyang, Zhao Dezhao, *et al.* Change of re-siltation in the Yangtze Estuary deepwater channel during 1 st and 2nd stages. Journal of Sediment Research, 2009;(2):22—28

Mechanism of Suspended Sediment Transport in the North Passage of the Yangtze River Estuary

HAO Lin-jie, SHAO Yu-yang*, TONG Chao-feng

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

[**Abstract**] The mechanism decomposition method is used for calculating the water and sediment date, the sediment flux has been divided into 8 dynamic items, the characteristics of the suspended sediment transport have been illustrated through exploring the mechanism of the advection, tidal pumping effects and the vertical circulation for sediment transport. The results show: in the year of the hydrological data measured, most of the suspended sediment in the North Passage of the Yangtze River Estuary comes from the upstream regions. The advection is the main factor to affect the suspended sediment transport. The tidal pumping effect plays a minor role. In the channel, the vertical circulation for sediment transport is mainly controlled by the Euler residual flow. The vertical sediment concentration changes significantly in the deeper region, the residual current directions are inconsistent in different vertical layers in the shallow estuary region, the vertical circulation plays a stronger role in the shallow regions.

[**Key words**] decomposition method suspended sediment transport North Passage of the Yangtze River Estuary