



滩槽泥沙交换对长江口北槽深水航道 回淤影响的分析

金 镠¹, 虞志英², 何 青²

(1. 交通部长江口航道管理局, 上海 200003; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 黏性细颗粒泥沙在潮汐水流中运动的主要特性之一是存在多种不同尺度的输运形态。就长江口而言, 其中1~2 m近底水流驱动下的高浓度悬沙输运应加重视。现场观测表明, 近底高浓度悬沙的生成与黏性细颗粒泥沙在潮汐水流中的沉降特性有关, 其输运对航道回淤的影响表现为滩槽之间的泥沙交换。初步估计横向水体高浓度悬沙输运造成12.5 m深水航道中段2 000万~3 000万m³的年回淤量是可能的。这可能是造成航道中段集中回淤的重要原因之一。

关键词: 滩槽泥沙交换; 黏性细颗粒泥沙; 高浓度悬沙; 回淤

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0115-09

Response of deepwater channel in north passage to water and sediment exchange between channel and shoal in the Yangtze estuary

JIN Liu¹, YU Zhi-ying², HE Qing²

(1. Administration Bureau of Navigation in Yangtze Estuary, Ministry of Communications, Shanghai 200003, China;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research of East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: It is one of the important features for cohesive fine sediment that there exist different transport patterns under the effect of the tidal currents. As for the Yangtze estuary, the high-concentrated mud suspension(HCMS) is driven by near-bottom flow with the range from 1 to 2 meters, to which we should pay more attention. The field investigation reveals that the generation of HCMS is related to the settlement characteristics of the cohesive fine sediment in tidal current. The effect of the HCMS movement to the back-siltation in the deepwater channel registers as the water and sediment exchange between channel and shoal. It is estimated that the HCMS transport in the transverse current may increase the amount of the back-siltation in middle of the 12.5 m deepwater channel up to 20 million ~30 million cubic meters. This would be one of the important factors resulting in back-siltation concentrated in the middle of the north passage.

Keywords: water and sediment exchange between channel and shoal; cohesive fine sediment; high concentrated mud suspension; back-siltation

长江口深水航道治理工程(1998-01—2011-03)从整治建筑物基本建成的2005年起, 航道回淤量就超出预期较多且沿程分布十分集中。三期工程期间(2006—2011), 在疏浚增深航道的同时, 于2008—2009年间实施YH101减淤工程, 加长了北槽中段约50 km范围内的丁坝, 2010-04—

2011-03, 航道中部淤积强度峰值有所降低, 出现了一定程度的坦化, D~J段回淤大幅降低, 但航道下段(O~V)和北槽进口段(ⅡN-A~B)淤强增大, 整个92.2 km航道回淤量高达约8 000万m³/a, 70%回淤量仍集中在航道中段20 km(K~O)区段内, 形势依然十分严峻。对此有必要对12.5 m航

收稿日期: 2012-06-05

作者简介: 金镠(1940—), 男, 教授级高级工程师, 从事港口、航道工程的建设管理工作。

道开通后回淤强度沿程分布规律、回淤原因和回淤机理、全航道内外水沙运动规律、回淤泥沙来源及滩槽泥沙交换等方面作全面分析,尤其需要对不同工程阶段的工程效益进行再认识和重新思考,其中有关内容已在文献[1]中有所阐述。本文将进一步依据现场实测资料分析北槽泥沙运动的基本形态、近底高浓度悬沙层的生成和运动机理以及滩槽泥沙交换所导致的航道回淤等,以期在北槽深水航道的回淤原因分析和减淤措施提供参考。

1 长江口泥沙的级配特征和泥沙运动的基本形态

1.1 长江口及北槽泥沙的级配特征和床沙与悬沙的交换

长江口从江阴至口外陆架区域,河床表层沉积物分布:江阴—长兴岛(属河口上段)和陆架区域, $d_{50} > 200 \mu\text{m}$,河口拦门沙区域 $d_{50} = 20 \sim 200 \mu\text{m}$,且北港 > 北槽 > 南槽^[2-3]。

根据Van Rijn建议的界定海床性质的标准^[4],长江口主槽河床可定为“粉砂质淤泥海床”,浅滩可定为“砂质淤泥海床”;由于都表现出明显的黏性,也都可归入“淤泥质海床”范畴。淤泥质海床性质与泥沙的絮凝密切相关。称在咸水中能发生絮凝的泥沙为黏性泥沙。长江口现场测验^[5]表明,黏性与非黏性泥沙的界限粒径为 0.032 mm 。当泥沙级配中小于等于 0.032 mm 的部分占优时,絮团联结成絮网使大于 0.032 mm 的分散颗粒难以穿越,泥沙的沉速取决于絮团的沉速,其在垂向上变化不大。相反,级配中大于 0.032 mm 的颗粒占优时,絮团数量较少,泥沙沉速主要取决于非黏性沙的级配,因此沉速在垂向上分布不均匀,呈现出“分选沉降”的特点。

长江口的悬沙级配,在拦门沙区段相对较粗,且垂向分布较不均匀,见图1,表明拦门沙区段由于径潮流相互作用强烈,潮流作用下泥沙再悬浮活跃,悬沙和床沙的交换频繁, d_{50} 的垂向梯度增大。

长江口北槽床沙和悬沙的交换特性,从级配曲线上可以看出。图2为北槽上段航道内底沙和悬沙采样得到的级配曲线,可知此处床沙中的粗颗

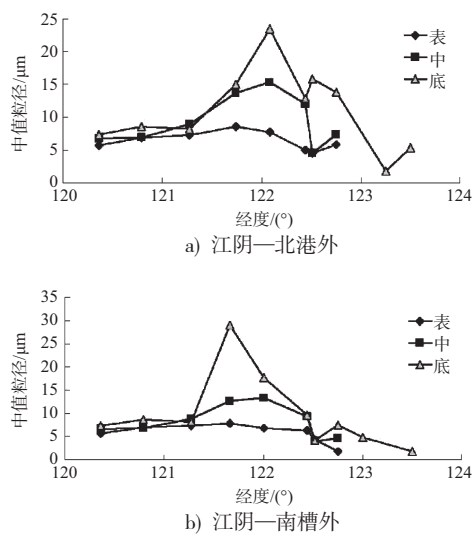


图1 长江口悬沙中值粒径沿程分布^[2]

粒($> 0.062 \mu\text{m}$)部分约占床沙的8%。这部分在悬沙中缺失,表明其只能作推移运动而不与悬沙发生交换。在北槽的中、下段,这部分泥沙的比例分别增加到20%~30%和30%~50%。悬沙级配中的细端部分大约占悬沙的5%,在床沙中缺失,可认为属冲泻质。

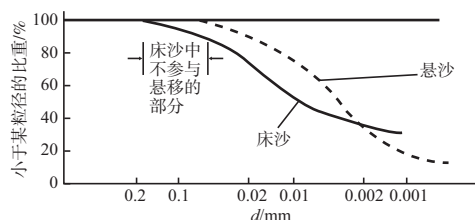


图2 北槽上段航道内底沙和悬沙采样得到的级配曲线

床沙与悬沙级配曲线的公共部分是参与交换的部分。在北槽上段,这部分的比例约为85%,说明悬沙大量参与造床。与此相反,河口上段(江阴—长兴岛)和口外陆架区域,公共部分的比例不足20%,表明悬沙很少参与造床,或冲泻质占有较高比例。因此,可以认为长江口拦门沙区段因其水动力较强,潮周期内泥沙的再悬浮活跃,床沙和悬沙总体上较粗且交换频繁。

1.2 北槽泥沙运动的基本形态和垂向分层结构

1.2.1 非黏性沙的推移运动

在黏性细颗粒泥沙为主的河口海岸,床沙中仍包含有一定量的非黏性沙。在潮汐水流中,水流切应力呈周期性变化。长江口由于存在较大的水流加速度,非黏性沙的推移运动应表现为层

移。层移是指由于颗粒被水流加速, 从速度较快的水流中取得动量, 通过颗粒之间和颗粒与河床之间的碰撞将动量传递给床面, 由此产生的法向离散应力使颗粒离开床面(液化)并随近底水流运移的输沙形态。它与跃移和悬移的一个重要区别是表现为贴近床面的薄层“整体性”运移, 即其输沙率与粒径无关^[6]。

1.2.2 黏性细颗粒泥沙在主流中的悬移运动

水流在垂向上划分为主流和近底边界层两个部分。主流中的悬移运动受泥沙垂向对流扩散和沉降的控制, 含沙量的垂线分布 $C(Z)$ 通常用Rouse公式描述:

$$\frac{C}{C_a} = \left[\frac{h-Z}{Z} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^{\frac{\omega_s}{\kappa u_*}} \quad (1)$$

式中: h 为水深; C_a 为参照高度 a 处的含沙量; 记 $Z = \frac{\omega_s}{\kappa u_*}$, 称为Rouse数, 是反映含沙量分布形态的参数。

正确定义和确定临底含沙量 C_a 较为困难。对黏性细颗粒泥沙, Van Rijn给出如下的实用公式^[4]:

$$C_a = 0.015(1 - P_{\text{clay}})f_{\text{silt}} \frac{d_{50} T^{1.5}}{a D_*^{0.5}} \quad (2)$$

式中: C 以体积浓度计; $T = \frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c}$ 为无因次床面有效切应力参数, τ_b 为床面水流切应力, τ_c 为床面沉积物临界起动切应力; $D_* = d_{50} \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{g}{v^2} \right]^{1/3}$ 为无因次泥沙参数, v 为水流黏滞系数, 常温下可取 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; P_{clay} 为床面沉积物中黏土所占比例, f_{silt} 为级配校正系数: $f_{\text{silt}} = \frac{0.062 \text{ } \mu\text{m}}{d_{50}}$ 。

式(2)显示, 水流切应力对水体含沙量及其分布有重要影响。图3示出临底含沙量与摩阻流速的关系, 可知, 临底含沙量和主流水体含沙量均随摩阻流速的增加而快速增大。因此在潮汐水流中, 在水流加速期间, 会有大量泥沙再悬浮进入主流。

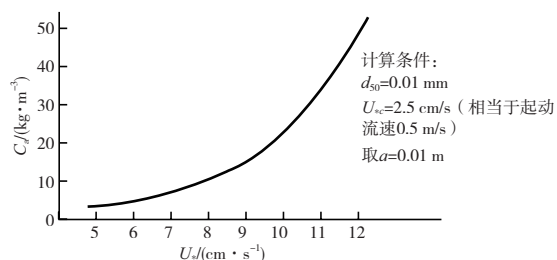


图3 临底参照高度含沙量与摩阻流速关系

为了测定长江口黏性泥沙在河口咸水环境中的絮凝沉降, 采用了激光散射粒度仪(Lisst-100)测定悬沙粒径谱, 同步采用浊度计(OBS)和声学多普勒流速仪(ADCP)测定含沙量及温、盐、流速分布等背景条件; 根据絮团的分形特性计算絮团密度, 最后由沉速公式得到悬沙的絮凝沉速^[5]。长江口拦门沙区段悬沙絮凝中值沉速 ω_{f50} 为: 冬季(10月—次年3月, 平均水温 10°C) 0.022 cm/s , 夏季(6—9月, 平均水温 26.2°C) 0.063 cm/s , 年均 0.041 cm/s 。

由对流-扩散和絮凝沉降控制的主流含沙量, 通常为零点几到几 kg/m^3 , 可称之为低浓度悬沙(Low Concentrated Mud Suspension, LCMS^[5]), 沉速 ω_{f50} 在垂向上均匀。由于参照高度 a 很小, 所以 C_a 自身对输沙率影响不大。长江口目前采用的二维潮流悬沙数模和浑水动床物模, 其所描述的泥沙运动仅限于黏性细颗粒泥沙在主流中的悬移运动, 即主要为低浓度悬沙的输移。

1.2.3 潮汐河口黏性细颗粒泥沙在近底边界层的悬移运动

黏性细颗粒泥沙在潮汐水流中的性状的一个重要特点是在水流切应力降低到一定程度后絮凝沉降占优使泥沙向床面集中, 水体下部含沙量增加, 泥沙沉降受周围颗粒的制约, 沉速降低(“制约沉降”); 近底泥沙浓度的增高又抑制了泥-水界面处的水体紊动, 使主流中的泥沙加速向床面集聚(“层化制紊效应”), 从而形成近底高浓度悬沙层(High-Concentrated Mud Suspension, HCMS^[7])。由于“制约沉降”和“层化制紊效应”的存在, 使HCMS具有一定的厚度, 仍能受到水流的明显驱动而产生较大的输沙量。

Winterwerp根据大量试验得到黏性细颗粒泥沙沉速与含沙浓度的关系如图4^[7], 可知, 以含沙量 $C=2 \sim 3 \text{ kg/m}^3$ 为界, 左边为絮凝沉降段, 沉速随含沙量增加而增大; 右边为制约沉降段, 沉速随含沙量增大而减小。

“层化制紊效应”则主要体现在减小泥沙的垂向交换系数, 从而对含沙量垂线分布产生影响^[4-7]。

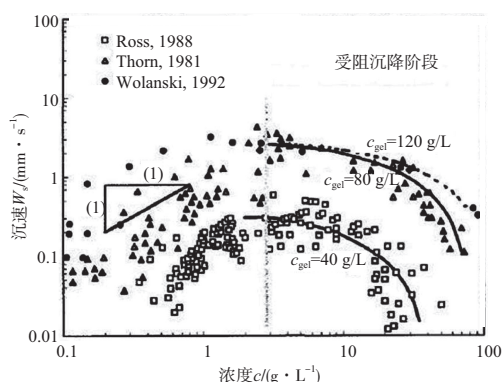
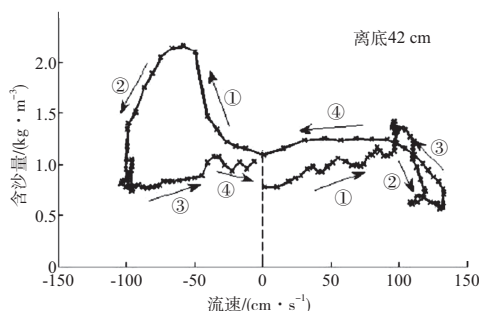


图4 黏性细颗粒泥沙沉降速度-浓度关系^[7]

因此，在潮汐水流中黏性细颗粒泥沙的近底含沙量，在不计平流输运的情况下，主要取决于床面泥沙的冲刷悬浮和主流含沙量向床面的集聚。图5为长江口某测站离底40 cm处的一个典型含沙量过程^[8]，可以看出在涨潮加速段，该高程处含沙量迅速增加，而在减速至憩流阶段，该高程处含沙量趋减；落潮流期间，含沙量变化不大。



注：落潮流速为正，涨潮流速为负。

图5 2005-01-10—2005-01-15长江口南槽上口离底40 cm处全潮含沙量过程^[8]

2008年8月在长江口北槽航道附近进行了多站点近底含沙量观测，图6为航道北侧I-N测点连续10个全潮、4个高程的整编含沙量。4个高程分别为离底40,80,120和150 cm，含沙量分别为涨潮期平均、落潮期平均、涨潮期最大和落潮期最大含沙量。可以看出，汛期近底高浓度悬沙有相当高的出现频率；高浓度悬沙层厚度约1~1.5 m，峰值浓度达12~18 kg/m³。离底1~1.5 m可以认为是主流低浓度悬沙层与近底高浓度悬沙层的分界。前者含沙量不影响水流的紊动结构与紊动强度；而后者，紊动受到明显抑制，因此其运动形态更像是水流切应力拖曳下的整体推移运动，与浑浊流相仿。由于离底1~1.5 m范围内流速仍然较大，因

此该悬沙层的输沙不能忽视。

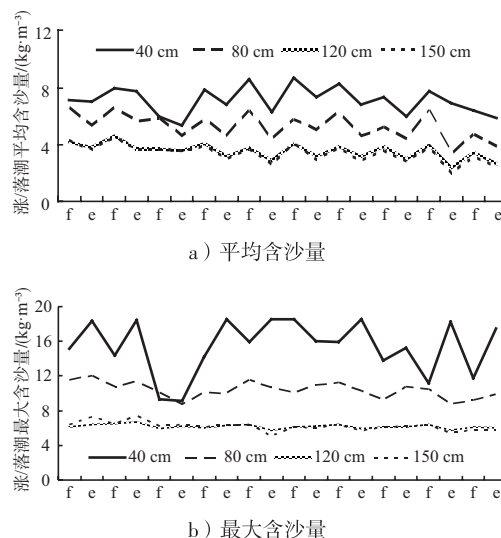


图6 2008-08北槽I-N测点连续10个潮实测近底含沙量^[9]

1.2.4 潮汐河口黏性细颗粒泥沙的近底边界层浮泥运动

前述近底高浓度悬沙层的下部，当浓度达到胶凝浓度 $C_{gel}=80\sim100\text{ kg/m}^3$ 时，将转化成为具有一定结构强度的非牛顿流体，即浮泥，其运动与其上的水体流动无关，而仅在重力作用下沿斜坡运移（重力流）。表2为2008年8月北槽航道北侧

表2 L-N测点离底15 cm处含沙量

日期	起讫时间	$\Delta t/h$	Δt 内平均含沙量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Δt 内最大含沙量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
8月2日	15:16—18:34	3.30	242.08	390.41
8月3日	02:35—07:12	3.62	49.39	81.99
8月3日	15:24—20:20	4.93	48.17	210.93
8月4日	06:46—07:44	0.97	77.84	102.02
8月4日	18:24—20:34	2.17	118.76	230.74
8月5日	04:56—06:00	1.07	42.92	87.25
8月5日	07:34—08:31	0.95	44.14	74.40
8月5日	16:36—21:19	4.72	161.87	294.51
8月6日	07:27—09:10	1.72	136.21	229.28
8月6日	11:46—15:04	3.30	167.24	246.6
8月6日	23:48—03:17	3.48	144.99	254.63
8月7日	12:04—13:05	1.00	66.99	129.35
8月7日	13:22—15:44	2.37	138.19	197.72
8月7日	23:46—03:30	3.73	97.79	187.83
8月8日	13:14—16:47	3.55	137.40	201.43
8月9日	01:00—04:14	3.23	148.23	233.51
8月9日	14:26—17:49	3.38	167.86	227.13
8月10日	02:38—07:23	4.75	142.77	280.99
8月10日	07:32—11:52	4.20	36.34	454.51

注：起讫时间以近底流速 $\leq 0.4\text{ m/s}$ 界定，即当近底流速 $\leq 0.4\text{ m/s}$ 时，会发生泥沙向床面的快速集聚，形成近底高浓度含沙层。

L-N站点离底0.15 m处的近底浓度^[9]。近底流速小于等于0.4 m/s是界定出现近底高浓度悬沙层的界限流速。由表2可知, 一潮中出现近底高浓度悬沙层的历时约1~4 h, 平均约3.2 h, 主要出现在涨潮流后期及涨转落的憩流时段; 离底0.15 m处, 泥沙浓度在胶凝点上下波动, 表明这一高程以下已经形成浮泥。

长江口北槽在一个潮周期内近底高浓度悬沙层及其下部密实成浮泥层的过程, 从实测资料的分析中可得到清晰反映^[10-11]。图7为2008年8月北

槽中段航道离底30 cm处的流速、含沙量过程和床面高程的变化, 表明近底高浓度悬沙层主要出现在涨转落的憩流前后, 历时约3 h, 含沙量峰值约20 kg/m³左右, 层厚超过30 cm; 在近底高浓度悬沙层出现之前床面冲刷变幅为5 cm左右。这部分在涨潮流期的床面冲刷可以提供近底高浓度悬沙层的物质来源。由于床面在全潮中冲淤平衡, 因此上述床面冲刷厚度可以看作一潮中床面活动层的厚度。图6所反映的数据与表2在量级上一致。

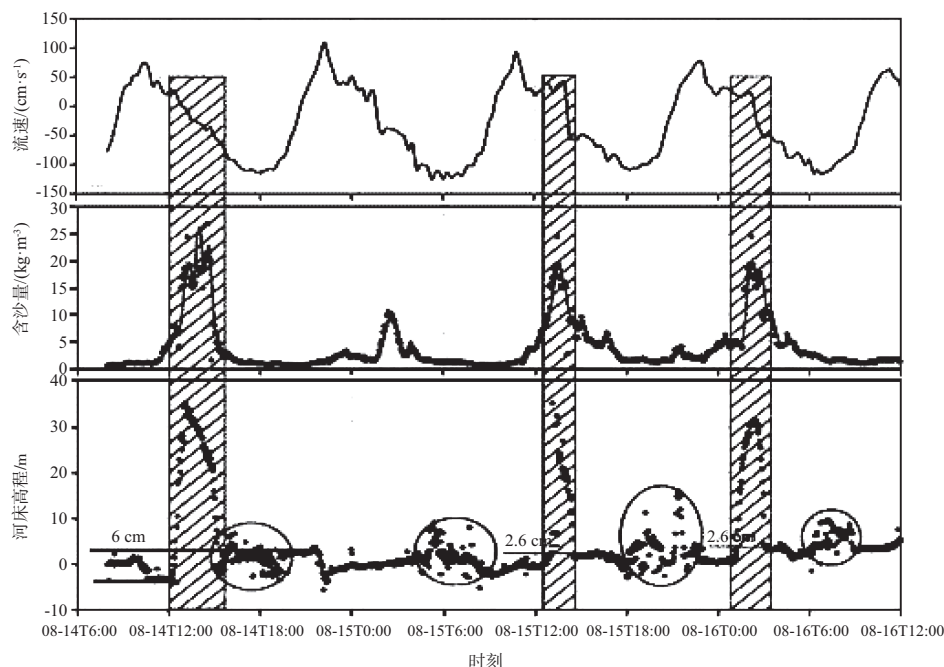


图7 2008-08-14—2008-08-16北槽中段航道近底30cm水沙和床面冲淤过程^[9]

综上所述, 长江口黏性细颗粒泥沙在潮汐水流中的基本运动形态可区分为主流中的较低浓度悬沙运移, 近底边界层的高浓度悬沙运移、近底浮泥重力流以及非黏性沙的贴底层移运动等具有不同垂向尺度的4种形态。基本运动形态的垂向结构见图8。

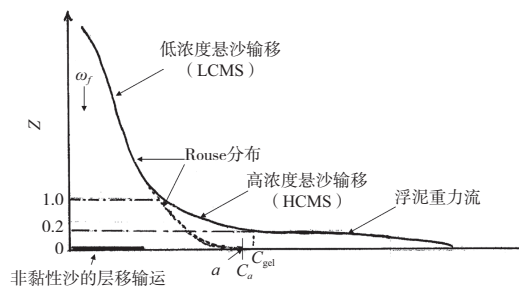


图8 黏性细颗粒泥沙在长江口潮汐水流中的基本运动形态结构

在长江口深水航道治理工程中采用的平面二维数学模型以及物理模型, 均只考虑了主流的低浓度悬沙输移, 而忽略了其它3种输沙形态。由于近底高浓度悬沙输移, 其含沙量高 (10 kg/m³以上), 输移厚度较大 (1 m左右), 维持的历时较长 (平均约3 h), 在此厚度内尚有30 cm/s左右的近底流速, 因此也会产生较大的输沙量。忽略这部分输沙, 可能会给输沙和回淤计算带来不小的误差。

2 长江口北槽深水航道中段高回淤强度产生机理的分析

2.1 北槽中段的流场特点

长江口北槽中段双导堤之间呈弯道形态, 水

文测验资料显示,存在明显的滩、槽之间的横向水流和法向余流分量。其产生原因:1)滩、槽流速过程之间存在相位差,涨落潮流路分歧引起流速切变。例如南汇边滩,余流的平面分布,滩地部分(-3 m以上)出现上滩流而主槽部分(-3 m以下)出现下滩流^[12];2)弯道水流表层与底层流向不一致而引起横向水流;3)由于滩、槽水流含盐度过程的相位差而引起的密度梯度所产生的横向水流。后两种机理,尚难以从目前已有的长江口北槽观测资料中加以鉴别和分离。

2.2 非黏性沙的层移输沙量及其对北槽中段航道回淤的贡献

估计潮汐水流中非黏性沙的层移输沙率,需先行确定泥沙从起动到层移和从层移到悬扬的临界条件。Abraham^[6]根据对195组试验数据的整理,得到前一个临界条件为:

$$\theta > 0.6, \theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gd} \quad (3)$$

为无因次水流切应力。

后一个临界条件为:

$$\frac{\omega_s}{U_*} > 0.8, \omega_s = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} gd \right)^{0.5} \quad (4)$$

为泥沙沉速。

得到层移单宽输沙率 q_b 为:

$$q_b = \frac{\tau_b u}{g(\rho_s - \rho_w)} = \frac{u_*^2 u}{g \left[\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right]} \quad (5)$$

式中: u 为垂线平均流速。

由试验数据统计得到层移层厚度 δ :

$$\delta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)g \tan \alpha} \quad (6)$$

式中: C 为层移层平均体积浓度,可取 $C=0.32$; α 为非黏性沙内摩擦角,可取 $\alpha=31^\circ$ 。对于天然砂, $\delta \approx (5 \sim 6)d$, d 为泥沙粒径。

由试验得到层移平均速度 U_b :

$$U_b = 6.58 U_* \quad (7)$$

针对长江口北槽的水、沙条件,由上述诸式可算得北槽一潮往复搬运的层移输沙量为52万t,

年往复搬运的总量为350万t,约为悬沙输沙量的2%。北槽中段近底流速与航道夹角约为 10° ,非黏性沙由层移方式进入航道的数量约为60万t或100万 m^3 ,对北槽中段深水航道的回淤贡献不大。受现场观测技术的制约,目前很难直接获取有关非黏性沙层移运动的数据,有待观测技术进一步完善。

2.3 主流低浓度悬沙(LCMS)输移对北槽深水航道回淤的贡献

主流低浓度悬沙输移引起的航道回淤为悬沙落淤,与行经航道的主流含沙量、滩槽高差和挖槽内水流切应力的降低程度有关;挖槽内水流切应力的降低程度又与挖槽浓度和挖槽与主流的夹角有关。这类泥沙输移并不直接表现为滩、槽之间的横向泥沙交换。由挖槽回淤的半经验公式(金-虞志英公式^[13]),按二期工程时的北槽地形,估算12.5 m航道的年维护量为3 700万 m^3 (含随淤随挖和台风影响);几家科研试验单位也给出类似的数模结果。三期减淤工程普遍加长丁坝、中段流速加大造成含沙量增加,加上地形变化等因素,估计得12.5 m航道的年维护量约5 000万 m^3 。

2.4 近底高浓度悬沙层(HCMS)输移对北槽深水航道回淤的贡献

由2008年8月北槽航道两侧6个站点近底水沙测验成果,统计得到汛期多潮平均一潮净输沙和余流见图9,各站点离底40 cm及80 cm(或120 cm)高度处的单宽输沙率及方向,以及进槽或上滩单宽输沙率列于表3。由图9可知,弯道段上游顺直段,净输沙和余流均与航道轴线平行;而在弯道段,净输沙或者指向航道成为航道回淤的直接来源,或者指向滩面,促进坝田淤积,为航道回淤提供了后备沙源。

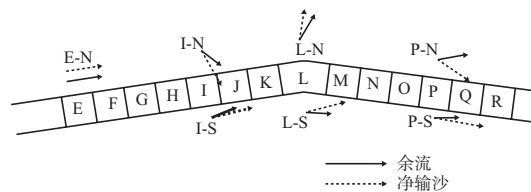


图9 北槽中段航道附近底余流及净输沙

表3 北槽航道两侧站点进槽一潮单宽输沙率统计

站点	时段	离底高度/cm	单宽净输沙率/(t·m ⁻²)	输沙方向/(°)	与航道轴线夹角α/(°)	进槽或上滩单宽净输沙率/(t·m ⁻²)
E-N	08-27—08-29	40	10.55	100.5	0.5	0.09
		120	10.24	94.2	-6.8	-1.21
I-N	08-01—08-11	40	31.42	148.7	47.7	23.24
		80	24.37	157.0	56.0	20.20
I-S	08-01—08-11	40	40.97	108.4	7.4	5.28
		120	28.28	112.9	11.9	5.83
L-N	08-02—09-06	40	15.31	96.7	-38.0	-4.46
		120	10.22	258.4	-6.0	-1.12
L-S	08-02—09-06	40	20.44	103.5	21.5	7.70
		80	18.34	123.5	25.4	7.35
P-N	08-13—08-26	40	7.25	145.4	20.4	2.53
		120	8.87	146.1	21.1	3.19
P-S	08-13—08-26	40	22.23	99.7	25.3	9.50
		120	9.31	107.3	17.7	2.83

注: 进槽为正。

表3结果表明, W₃附近的弯段, 除L-N为净输沙上滩外, 其余均为净输沙进槽, 其中以I-N站点最为显著。取近底高浓度悬沙层厚0.8 m, 下部浮泥层厚0.15 m。从浮泥层顶到离底0.40 m范围内输沙率取线性变化。由此估计I单元从北侧进槽的输沙量, 汛期6个月总计为: $[11.6 \text{ t/m}^2 \times 0.25 \text{ m} + 0.5(23.24 \text{ kg/m} + 20.20 \text{ kg/m}) \times 0.4 \text{ m}] \times 2000 \text{ m} \times 350 \approx 810 \text{ 万t}$ (干沙)。

上式计算离底0.8 m的输沙量(不考虑浮泥层), 11.6 t/m²为近底高浓度悬沙层单宽输沙率, 0.25 m为扣除浮泥层厚度的高浓度悬沙层厚度, 23.24 kg/m和20.2 kg/m分别表示上层(离底0.4~0.8 m这一段)水体上、下层含沙量, 0.4 m为上层水体厚度, 2 000 m为I单宽长度, 350为潮周期个数, 见图10。

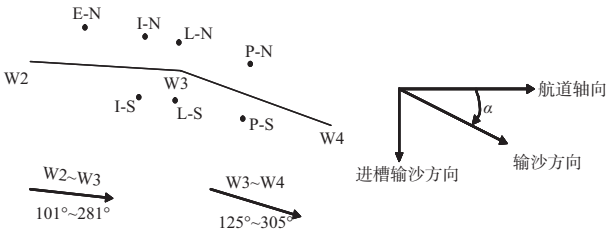


图10 北槽单宽输沙计算示意图

根据历年台风骤淤形成碍航淤积的比例, 如取航槽内沉沙率为60%, 则汛期由近底高浓度悬

沙输沙进槽形成的回淤量约490万t(干沙), 折合回淤量约900万m³(湿密度1.34 t/m³)。仿此, 计算I单元和L单元从南侧, P单元从两侧的汛期输沙进槽总量亦为900万m³。上述合计为1 800万m³。取枯季回淤量为汛期回淤量的1/3, 则北槽12.5 m深水航道弯段由近底高浓度悬沙输沙造成的回淤量可达2 500万t的量级。这部分回淤, 不仅使航道的回淤总量有较大增加, 更是造成回淤量在弯段异常集中的重要原因。

这一类型的输沙, 与滩、槽水沙交换直接相联系, 其生成与运动机理与主流低浓度悬沙不同。应建立相应的数学模型以提供工程设计所需。可以借鉴潮汐水流近底高浓度生成模型和浑浊流模型来计算其规模和推进速度, 例如Winterwerp^[7]和Hürzeler等^[14]的工作。

2.5 近底浮泥层运移对北槽航道回淤的贡献

浮泥层由高浓度悬沙层下部进一步密实形成, 其运移与上覆水流无关而是作为重力流沿底坡运动。因此, 滩面上的浮泥可以沿浅滩的横向底坡进入航道。初步分析, 北槽滩地横向底坡约10⁻²~10⁻³, 属于缓坡, 可暂不考虑浮泥层运移进槽的影响。详细估计其输沙, 亦应建立相应的数学模型, 例如Van Kessel等的工作^[15]。

3 结语

1) 长江口包括北槽在内的拦门沙区段, 床沙以黏性细颗粒泥沙为主, 也包含少量非黏性沙, 海床表现出明显的黏性。现场测验得到黏性和非黏性砂的界限粒径为 0.032 mm 。水温是影响悬沙絮凝沉速的重要因素。天然条件下, 冬季和夏季的悬沙絮凝中值沉速分别为 0.022 cm/s 和 0.063 cm/s , 年均均为 0.041 cm/s 。

2) 分析北槽航道的回淤规律, 首先应分析现场观测资料以了解泥沙运动的基本形态。长江口泥沙在潮汐水流中的基本运动形态包括黏性泥沙的主流低浓度悬沙的平流扩散输移、近底 $1\sim 1.5\text{ m}$ 高浓度悬沙输移、近底 $10\sim 20\text{ cm}$ 浮泥层重力流运动和非黏性砂贴床面薄层层移输运, 泥沙运动显示出垂向的分层结构。主流中的低浓度悬沙输移的基础是对流扩散与絮凝沉降相平衡而形成的Rouse型含沙量垂线分布。主流行经人工航道, 由于水动力减弱而引起回淤。目前长江口所作的回淤预测均仅针对这一类泥沙输运形态进行。这类泥沙输运引起的航道回淤并不直接表现为滩槽之间的泥沙交换。其所引起的 12.5 m 航道的回淤量, 三期工程后约 $5\,000\text{万 m}^3/\text{a}$ 。近底高浓度悬沙层主要在涨潮流后期至憩流期间, 由泥沙向床面沉降集聚形成。长江口北槽近底边界层水沙观测表明, 该层的厚度约 1 m , 维持时间约 3 h , 峰值含沙量在 10 kg/m^3 以上, 且有较高的出现频率。北槽中段航道, 由于流速切变等原因, 这部分泥沙主要输向航道, 成为滩槽泥沙交换的主要表现形式。滩槽横向水流驱动近底高浓度悬沙进入航道, 造成中段 12.5 m 航道产生 $2\,000\text{万}\sim 3\,000\text{万 m}^3$ 的年回淤量是有可能的, 这也是造成回淤在此段异常集中的重要原因。浮泥沿斜坡的运移和非黏性沙的层移输运, 对航道回淤的影响估计不大。已有的回淤数值模型和物理模型, 均未考虑后3种输沙类型, 尤其是忽略了近底高浓度悬沙输运, 造成回淤量的低估和减淤措施方案模型筛选的可靠性不够。

3) 关于进一步研究北槽深水航道的减淤措

施, 建议分两步走, 首先利用现有数、物模平台, 对减淤工程方案进行初步比较, 着眼于在保持北槽落潮流输沙优势的前提下, 使流场的调整达到2个目的, 即适当降低北槽中段流速, 使北槽沿程水动力分布有所均匀化; 削弱北槽中段涨落潮流路分歧, 缩短憩流时段, 并尽量消除滩槽之间的横向流速分量, 以及通过建设低高度潜顺坝阻挡近底高浓度水层进槽的可能性; 第二步完善数模功能使之能反映近底高浓度悬沙的生成和在横向水流驱动下进槽、上滩的物理过程, 以及浮泥重力流输沙等, 以提高定量预测的正确性。

4) 本文未涉及北槽回淤的泥沙来源问题。初步分析, 南北导堤沿堤流冲刷等北槽海域来沙的新形态应该重视。

参考文献:

- [1] 金鏐, 虞志英, 何青. 深水航道的河势控制和航道回淤问题[J]. 中国港湾建设, 2012 (1): 1-8.
- [2] 刘红. 长江河口泥沙混合和交换过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [3] 刘红, 何青, Gert Jan Weltje, 等. 长江入海泥沙的交换和输移过程——兼论泥质区的泥库效应[J]. 地理学报, 2011, 66 (3): 1-15.
- [4] Leo C, Van Rijn. Unified view of sediment transport by currents and waves[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 2007(6): 649-667.
- [5] 唐建华. 长江口及其邻近海域黏性细颗粒泥沙絮凝特性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [6] Abrahams A D. Bed-load transport equation for sheet flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 2003(2): 159-163.
- [7] Winterwerp J C. On the Dynamics of High-Concentrated Mud Suspension[D]. Delft: Delft University of Technology, 1999.
- [8] 王元叶, 何青, 刘红. 长江口浑浊带近底泥沙浓度变化[J]. 泥沙研究, 2009(6): 6-13.
- [9] 上海河口海岸科学研究中心. 2008年8月长江口深水航道北槽近底水沙观测分析报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2008.

- [10] 徐俊杰. 基于底边界层研究的航道回淤机制分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [11] 徐俊杰, 何青, 王元叶. 底边界层水沙观测系统和应用[J]. 海洋工程, 2009, 27(1): 55-61.
- [12] 朱慧芳, 孙介民. 长江河口滩, 槽流速切变锋及其对悬沙输移的影响[G]//长江河口最大浑浊带和河口锋研究论文选集. 上海: 华东师范大学出版社, 1995.
- [13] 金鏐, 虞志英. 连云港地区泥沙运移和冲淤趋势[G]//连云港回淤研究论文集. 南京: 河海大学出版社, 1990.
- [14] Hürzeler B E, Imberger J, Ivey G N. Dynamics of turbidity current with reversing buoyancy[J]. Journal of Hydraulics Engineering: ASCE, 1996(5): 230-236.
- [15] Kessel T V, Kranenburg C. Gravity current of fluid mud on sloping bed[J]. Journal of Hydraulics Engineering: ASCE, 1996(12): 710-717.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

长江口12.5 m深水航道开通以来, 发挥了巨大的经济和社会效益, 但是, 全长92.2 km的12.5 m深水航道年回淤量逐年增大, 据统计, 2010年为8 015万 m^3 , 2011年为8 546万 m^3 , 2012年达到了10 080万 m^3 , 形势十分严峻。因此, 进行深水航道的回淤原因和机理、全航道内外水沙运动规律及滩槽泥沙交换等方面的分析、研究, 对于12.5 m深水航道回淤原因分析和采取合理的减淤措施, 具有重要的指导意义。

作者根据现场实测资料, 首先, 分析了床沙与悬沙的交换特点、北槽泥沙运动4种形式, 包括: 非黏性沙的推移运动、黏性细颗粒泥沙在主流中的悬移运动、近底边界层的悬移和浮泥运动; 然后, 详细分析了4种泥沙运动各自对深水航道泥沙回淤的影响, 尤其是北槽深水航道中段高回淤强度产生的机理; 分析研究得到: 近底高浓度悬沙输运及滩槽泥沙交换, 可能造成12.5 m深水航道中段2 000万~3 000万 m^3 的年回淤量。

研究基于大量实测资料详细精辟地分析, 其成果具有很高的学术水平和应用价值, 可供北槽深水航道的回淤原因分析和减淤措施研究参考。

2014年12月

评委简历:



朱志夏, 博士, 中国、美国博士后, 江苏省高层次创新创业人才, 副研究员, 江苏省水运工程技术研究中心总工程师。

从事河流、河口、海岸、海洋水动力学、泥沙运动的基础理论和港口、航道、海岸、近海工程应用研究及教学工作。主持和技术负责国家和省部级科研课题十几项, 申请发明专利和软件著作权2项, 在*Journal of Coastal Research*、《水利学报》、《海洋学报》、《上海交通大学学报》等专业刊物上发表论文30余篇, 其中, SCI、EI 检索十几篇。