

东大港水道水体含沙量的变化及垂线分布

吴德安^{1,2}, 张忍顺³, 童朝锋^{1,2}

(1. 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; 2. 河海大学 交通、海洋学院, 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: 根据东大港水道所设站位连续 2 个潮周期的水文、泥沙测量资料, 对水体含沙的悬浮与沉降潮流动力过程进行了论述, 水体各层含沙量与潮流大小之间存在着动力响应关系。对水道含沙量垂线分布关系进行了分析和构建, 给出了对数关系式, 明确了西洋水道主槽水体含沙量垂线分布特征。

关键词: 东大港水道; 潮流; 含沙量; 垂线分布; 拟合

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096 (2007) 11-0055-06

悬浮颗粒垂线浓度分布被认为是研究含沙水流中颗粒运动特性的主要指标, 这项有意义的研究以 Rouse 经典理论的提出和随后 Vanoni 的实验研究为标志^[1], 并在此后取得了很大的进展, 许多学者提出了各种理论和公式。在稳定平衡条件下, 由沉降引起的泥沙向下运动和由紊动引起的泥沙向上运动, 必须保持平衡, 在此基础上可以得到 Rouse 含沙量分布公式^[1]。该公式应用于泥沙较细且含沙量较小的河流中, 与实测资料比较符合, 但如果泥沙较粗或浓度较大, 计算结果与实测资料有较大偏差。用 Rouse 公式计算的水面含沙量总是为零和床面含沙量总为无穷大, 这显然不符合实际的。造成这种缺陷的主要原因是引用了对数型流速分布公式, 利用对数型流速分布公式推求流速梯度等有关问题时, 往往难以反映实际情况。因此, 许多泥沙研究工作者试图对 Rouse 公式进行修正。为了使含沙量在整个流区内都能适用, 张红武^[2,3]建立了含沙量垂线分布公式。该公式克服了 Rouse 公式在水面和底床部位出现的缺陷。倪晋仁、王光谦^[4]对悬移质浓度垂线分布的各种理论及其之间关系进行了研究和探讨, 建立了悬移质浓度垂线分布的统一公式形式。倪晋仁等^[5]此后对此又作了进一步的阐释: 过去此类研究多源于连续介质理论, 当撇开理论的具体内涵而直接比较其最终方程形式时却

都接近得到与扩散方程类似的形式, 并具体体现为泥沙扩散系数的差异方面。这说明从各种理论出发得到的诸公式有可能用更一般的形式表达。倪晋仁等^[6]利用低浓度两相流中固相和液相的相互作用理论, 从基本的动量方程和连续方程出发, 将悬浮固体颗粒的存在视为对相同流动条件下清水紊流的摄动, 引入摄动分析的理论, 并通过动量方程直接得出了悬移质泥沙浓度分布规律, 对悬移质泥沙分布的统一公式给出了理论解释。

辐射沙洲海域是水、沙动力相互作用较强的海域, 该海域辐射状相间分布的沙洲和潮沟是潮流和泥沙相互作用的结果。泥沙的输送和运移, 悬移质占主要部分, 对含沙量垂线分布规律的研究是探讨悬移质运动的一个核心问题, 它的确定不仅能对潮流作用下水体含沙运动机理有更为深刻的认识, 而且对海洋工程计算悬移质输沙率和输沙量进行规划设计有着重

收稿日期: 2006-11-28; 修回日期: 2007-08-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50339010); 江苏省重点项目 (K11110BY2D)

作者简介: 吴德安 (1968-), 男, 江苏徐州人, 博士, 主要从事海岸动力和数值模拟方面的研究工作, E-mail: wudean@163.com

要的实际意义。作者利用东大港主槽设立的4号测量站位^[8]连续两个潮周期(1998年9月22日19时至23日20时)的测量资料对水体含沙的潮动力过程及垂线分布规律进行分析。

1 潮特征

1.1 水位变化

4号站位本次测量最大潮差约为6.2 m。涨潮过程,水位增长较快,从低潮到高潮约需5 h。落潮过程水位变化较缓慢,从高潮到低潮约需7 h。涨急流速出现在高潮前约2 h,落急流速出现在低潮前约2 h。最低水位和最高水位都出现在憩流期间。潮汐性质属于典型的半日潮,涨落潮历时之比约为5:7。

1.2 流速矢量过程

图1是4号站位连续两个潮周期各层流速矢量过

程,箭头方向为流向。本次测量所得涨潮表层最大流速是2.86 m/s,流向148°;中层最大流速为2.23 m/s,流向为140°;临底层最大流速为1.67 m/s,流向是140°。涨潮各层最大流速的流向基本一致,各层流速较大。涨潮期间,表层平均流速为1.71 m/s,中层为1.33 m/s,临底层为0.95 m/s。

落潮表层最大流速1.28 m/s,流向是338°;中层最大流速为1.02 m/s,流向是349°;底层最大流速是0.66 m/s,流向358°,落潮中、表层最大流速大约是临底层相应值的1倍。落潮过程表、中、临底层平均流速分别为0.73,0.61,0.43 m/s。涨潮各层平均流速约是落潮相应值的1倍左右。总之,本站位潮流表现为涨强而落弱的特点,各层流向基本一致。

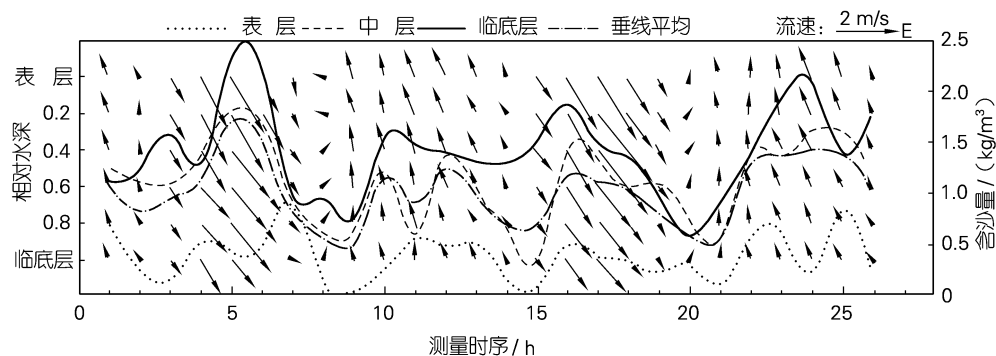


图1 各层含沙量、流速潮过程

Fig.1 The processes of suspended sediment concentration and current velocity of each layer

2 各层含沙量的变化过程

2.1 含沙量特征

图1所示,垂线平均含沙量随流速变化明显。垂线平均含沙量,基本上随流速的增大而增大。由于沙颗粒上扬、扩散、沉降是需要一定的时间的惯性过程,垂线平均含沙量与流速之间的变化并不是完全同步的,水深变化对垂线平均含沙量也有一定的影响。涨潮垂线平均含沙量的最大值及平均值略大于落潮垂线平均含沙量的最大值及平均值。涨、落潮垂线平均含沙量的统计标准差基本相等,为0.313 kg/m³。

由图1表、中、临底层含沙量过程曲线可见,各层含沙量有4次峰值和4次谷值的变化。含沙量峰值

出现在流急之前约1 h,含沙量谷值出现在落潮后约1 h左右。涨潮期间表层含沙量的最大值和平均值比落潮期间的表层含沙量相应值稍大。涨、落潮期间含沙量的离散程度也相当,涨潮期间表层含沙量的标准差为0.244 kg/m³,而落潮期间的含沙量标准差为0.235 kg/m³。涨潮期间临底层含沙量的最大值比落潮期间的临底层含沙量相应值大0.20 kg/m³,平均值以涨潮稍大。临底层含沙量的离散程度也以涨潮为大,涨潮期间临底层含沙量的标准差为0.455 kg/m³,而落潮期间的临底层含沙标准差为0.406 kg/m³。

2.2 含沙量悬浮沉降过程

图1中,表、中、临底层含沙量有如下潮变化过程:在落潮对应的憩流前约1 h,临底层含沙量开

始增长, 2 h 后达到一个峰值, 中层、表层含沙量在此期间是持续减少的, 这说明, 在落潮末期, 各层流速减小, 重力作用占优, 各层含沙量开始下沉, 由于临底层含沙能够得到上部下沉含沙的补充, 含沙量还能够继续上升。憩流过后, 涨潮流速开始增大, 湍流动力作用加强, 临底层含沙量较为迅速地增大, 泥沙向中层扩散, 中层含沙量开始缓慢增加, 但水体含沙扩散作用还没有达到表层, 所以表层含沙量还在继续减小。涨潮后约 0.5 h, 中层含沙量开始相对平缓增加, 在涨潮约 1.5 h 后, 与临底层含沙量一道迅速增大, 在涨急后约 0.5 h 左右, 中层、临底层含沙量达到峰值, 随着流速的减小, 二者开始下降。在落潮约 1.5 h 后, 各层含沙量都下降到各自的谷值。随着落潮流速的继续增大, 床底泥沙上扬悬浮, 各层含沙量又开始增大, 在落急前约 1 h, 底层、中层含沙量达到峰值, 但这一峰值比涨潮阶段峰值要小 0.8 kg/m^3 , 这是因为涨潮流速相对迅疾的缘故。临底层含沙量此后缓慢下降, 在憩流前 1 h 左右达到谷值, 中层含沙量在憩流后下降到谷值。此间, 表层含沙量的变化又有所不同, 表层含沙量大小变化不大, 表层含沙量下降与中层基本同步, 但其峰值的出现要落后于中、临底层。

总之, 表、中、临底层含沙量有如下潮变化特征: 即临底层含沙量对流速大小和流速变化较为敏感。中层含沙量不仅和流速大小有关, 而且和临底层含沙量、表层含沙量的大小变化有关。各层含沙量的相应峰值、谷值的出现有一定的时间差。临底层峰值的出现在临底层流速和垂线平均流速相差开始增大处, 以及在涨急和落急时刻附近。这意味着水体底部速度垂直切变增大, 水流紊动强度增大, 底床扬沙能力增强而使临底层含沙量增大。

3 含沙量垂线分布及拟合关系

3.1 含沙量垂线分布特征及其拟合

在 4 号站位连续两个潮周期的测量中, 分别在表层 (水面下 0.5 m 处), 相对水深 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 以及临底层 (底床上 0.5 m 处) 测得各水层对应含沙量。对数据进行分析发现: 如以 $y=1-z/h$ (z 为水层距床面距离, h 为水深, 单位为 m) 为纵坐标, 对应含沙

量 C (kg/m^3) 值为横坐标, 采用 e 指数函数形式进行拟合, 可得到相关性较好的拟合关系。图 2 为连续 12 个时刻对应的拟合结果, T 为测量序列序数。

得到如下拟合关系式:

$$y=ae^{(C/b)}, (a,b \text{ 为拟合系数}) \quad (1)$$

除了在憩流期间, 其它时刻含沙量垂线分布满足 e 指数函数关系, 且相关性较好。对 (1) 进行变换:

$$C=b\ln(y/a)$$

$$\text{得: } C = b \ln\left(\frac{h-z}{h}\right) - b \ln a \quad (2)$$

由拟合曲线趋势可知, 此拟合关系在临底层以下也应成立, 当 $z \rightarrow 0^+$, 可得到近床面处水体的含沙量:

$$C_b = -b \ln a \quad (3)$$

3.2 水体下层含沙量分布关系

利用 (3) 式计算得到的 C_b 与临底层含沙量 C_6 之间有如图 3 所示的拟合关系:

$$C_b = 0.0678 + 0.976C_6, \text{ 相关系数 } r = 0.996 \quad (4)$$

根据 (4) 式, 由临底层含沙量可得到近床床处水体含沙量。

利用临底层含沙量 C_6 和相对水深 0.8 处水层含沙量 C_5 进行拟合, 结果发现, 在涨、落潮过程分别有图 4、图 5 所示的相关性较强的 e 指数函数拟合关系式 (5) 和 (6):

涨潮过程:

$$C_5 = 0.620 + 0.136e^{(C_6/0.949)}, r^2 = 0.986 \quad (5)$$

落潮过程:

$$C_5 = -0.413 + 0.728e^{(C_6/1.58)}, r^2 = 0.986 \quad (6)$$

涨、落潮拟合函数形式相同, 但函数性态是有所差别。落潮底部含沙量垂线分布较均匀些, 而涨潮水体底部含沙量垂直梯度相对大一些, 这从两个曲线曲率和斜率大小都不难发现这一结论。这一差异不仅和涨落潮流的流速差异有关, 也和涨落潮水所携带的背景含沙量的差异有关。两条拟合曲线的曲率都不大, 都可近似用线性关系来表示。

上述近似线性相关关系进一步揭示了水体底部各层含沙量变化的一致性, 层与层越邻近, 含沙量线性相关越强, 进而可以推断临底层以下含沙量的垂直分布也应满足 e 指数函数关系。

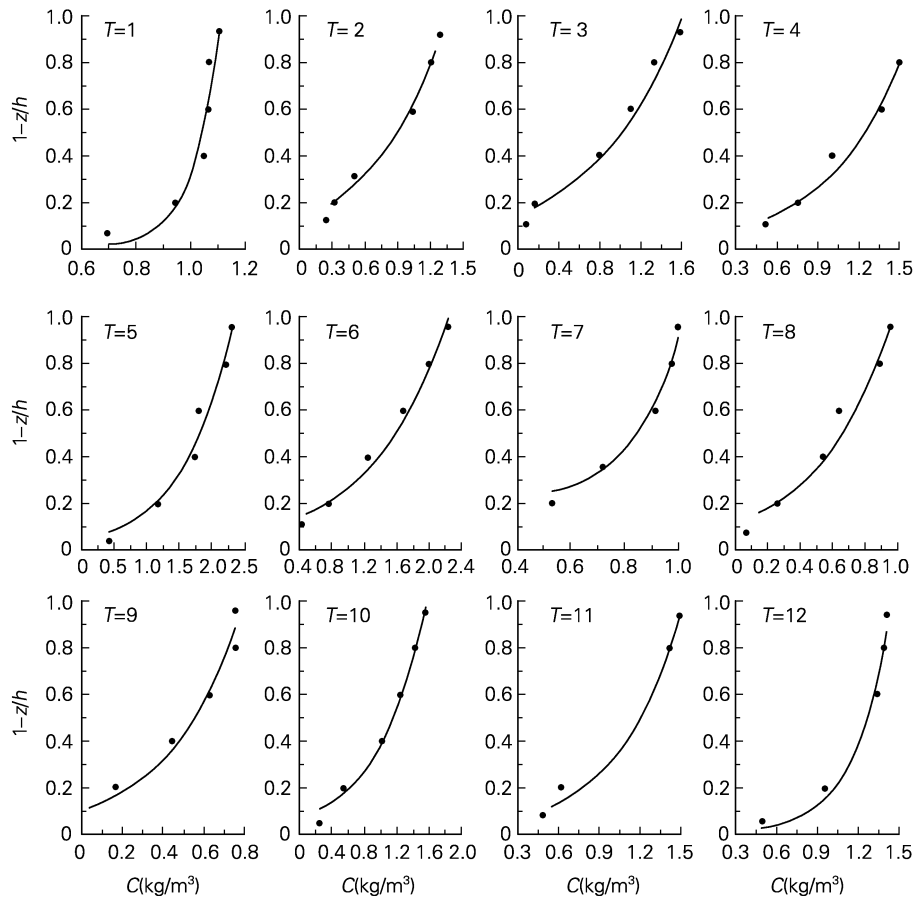


图2 含沙量垂线分布拟合

Fig.2 The fitting relationship of suspended sediment concentration with a relative depth

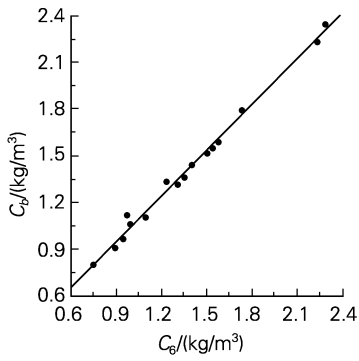


图3 C_b 与 C_6 的拟合关系

Fig.3 The fitting relationship between C_b and C_6

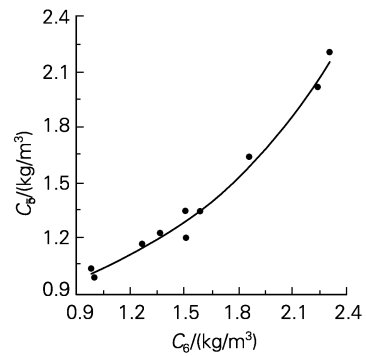


图4 涨潮 C_5 和 C_6 拟合关系

Fig.4 Fitting relationships between C_5 and C_6 during a flood

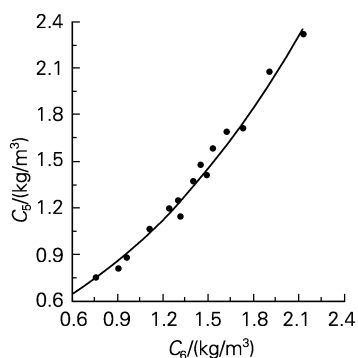


图5 落潮 C_5 和 C_6 拟合关系

Fig.5 Fitting relationships between C_5 and C_6 during an ebb

当 $z=h$, 在水面时, 含沙量没有实际物理意义。实际上上层含沙量的测量是在水面以下 0.5 m 处测量

的。

3.3 含沙量实用计算式

假设在 $z=y$ 处的含沙量为 C_y 已知, 由式 (2) 和 (3) 式, 有:

$$b = (C_y - C_b) / \ln\left(\frac{h-y}{h}\right) \quad (7)$$

把 (7) 代入 (2), 得:

$$C = (C_y - C_b) \ln\left(\frac{h-z}{h}\right) / \ln\left(\frac{h-y}{h}\right) + C_b \quad (8)$$

其中, $C_b=0.0678+0.976C_6$ 。

由关系式 (8), 给定临底层含沙量 C_6 和另外一点 $z=y$ 处的含沙量 C_y 就可确定含沙量垂线分布。

3.4 关系式 (8) 的验证及其适应性

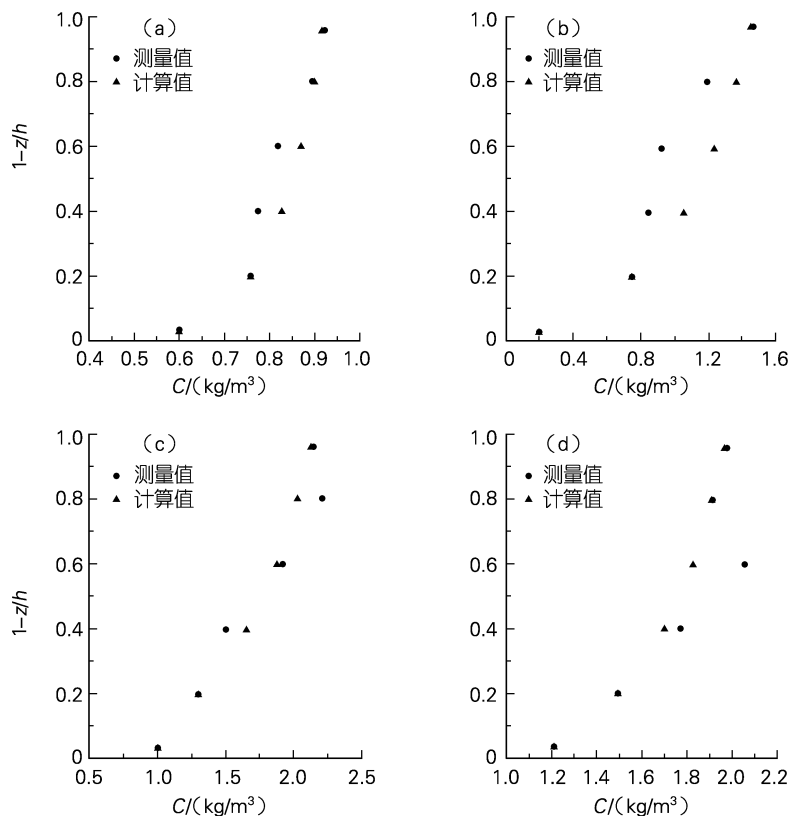


图6 7号站位悬沙分布对关系式 (8) 的验证

Fig.6 Testifying the distribution of suspended sediments to formula (8) at No.7 station

在西洋水道 7 号站位^[8]进行了连续两个潮周期的 (1998 年 10 月 5 日 10 时~6 日 11 时) 的潮流、含沙量

的测量。取 7 号站位连续 4 个 (a, b, c, d) 测量时刻的表层含沙量和临底层含沙量代入关系式 (8), 进行相应水层含沙量的计算, 各层含沙量的计算值与实测值的对比结果见图 6, 可见计算值和测量值基本吻合。上述验证在一定程度上说明拟合关系式 (8) 在西洋水道主槽具有一定的适应性, 可以大致反映西洋水道在潮流作用下的含沙量垂线分布。

虽然测量本身存在着误差, 但拟合方法的优势在于可以把握测量资料的总体趋势特征而求得其在规律。当然, 测量精度越高、序列越长、采样数据分布越密集, 对含沙量分布规律的把握愈准确。图 2 的拟合情况可以看到, (8) 式对数分布规律可以较为准确的反映本站位含沙量垂线分布情况。要指出的是, 在憩流附近流速较小时刻, 含沙量垂线分布较为混乱而对上述分布规律偏差相对较大。

4 小结

作者对 4 号站位所测潮流和含沙量特征进行了分析, 体现为涨强而落弱的特点。涨潮各层含沙量统计特征值要大于落潮含沙量对应统计特征值。对各层含沙量的潮流过程进行了分析, 各层含沙量变化过程是复杂但有规律可循的。拟合得出了含沙量的垂线分布, 在非定常流作用的情况下, 水体含沙量也可具有

一定的稳定的分布数学形态, 只是数学表达式的系数在随时发生着变化。关系式 (8) 完全是拟合分析的结果, 缺乏理论的推导和解释, 对该分布规律的认识还需利用先进仪器和科学测量方法, 并在此基础上进行动力机制研究。

参考文献:

- [1] 杨志达. 泥沙输送理论与实践[M]. 李文学译. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. 87-90.
- [2] 张红武. 黄河泥沙基本理论研究进展述评[J]. 人民黄河, 1996, 12: 22-28.
- [3] 张红武. 挟沙水流中含沙量沿垂线的分布规律[J]. 泥沙研究, 1997, 1: 35-41.
- [4] Ni Jinren, Wang Guangqian. Vertical sediment distribution[J]. *J Hydr Engrg, ASCE*, 1991, 117(9): 1184-1195.
- [5] 倪晋仁, 惠遇甲. 悬移质浓度垂线分布的各种理论及其关系[J]. 水利水运科学研究, 1988, 11: 83-97.
- [6] 倪晋仁, 周东火. 低浓度固液两相流中泥沙垂直分布的摄动理论解释[J]. 水利学报, 1999, 5: 1-5.
- [7] 吴德安, 张忍顺, 沈永明. 江苏辐射沙洲水道垂线平均余流的计算与分析[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(4): 289-295.

Dynamical process and vertical distribution of suspended sediments in Dongdagang tide channel

WU De-an^{1, 2}, ZHANG Ren-shun³, TONG Chao-feng^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 2. College of Traffic, College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. The Ocean and Mudflat Institute of Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Received: Nov., 28, 2006

Key words: Dongdagang channel; tidal current; suspended sediment concentration; vertical distribution; fitting

Abstract: On the basis of analyzing the two tidal periods' successive survey results on the tidal current and suspended sediments at No.4 station in the tidal channel called Dongdagang, the characters of tidal current and the rule of suspended sediment change are further studied. The surveyed suspended sediment concentration data were fitted to the relative depth. The vertical distribution characters of suspended sediments were discovered.

(本文编辑: 刘珊珊)