



# 长江口北槽悬沙垂线分布经验公式研究\*

顾峰峰, 沈 淇, 孔令双, 万远扬, 王 巍

(上海河口海岸科学研究中心, 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201)

**摘要:** 利用Rouse公式对长江口多次实测资料进行整理分析, 得出了长江口北槽纵向悬沙垂线分布的特征, 验证了描述悬浮泥沙垂线分布的Rouse公式的适用性, 阐明了利用Rouse公式推算得到的不平衡条件下泥沙沉速与实际泥沙沉速的差异, 并利用不平衡条件下的垂线分布公式和北槽悬沙垂线分布实测资料, 率定和验证了不平衡输沙系数和垂线平均含沙量的经验关系式, 在此基础上, 建立了适用描述长江口北槽悬沙垂线分布的经验公式, 并通过实测资料得到了验证。

**关键词:** 长江口北槽; 悬沙分布; Rouse公式

**中图分类号:** TV 142

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2013)11-0142-05

## Empirical formula of vertical distribution of suspended sediment in the Yangtze estuary

GU Feng-feng, SHENG Qi, KONG Ling-shuang, WAN Yuan-yang, WANG Wei

(Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering, Ministry of Transport, Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

**Abstract:** Based on the Rouse formula, the suspended sediment characteristics of vertical distribution is studied and analyzed by data measured and collected in the Yangtze estuary, and the applicability of the formula Rouse is verified. The difference between the settling velocity of sediment calculated by Rouse formula and the actual sediment settling velocity is clarified. Using the sediment vertical distribution of measured data in the north channel, the relationship of the unbalanced empirical formula of sediment coefficient and vertical average sediment concentration is established, based on which, an empirical formula of vertical distribution of suspended sediment is established and verified by measured data.

**Key words:** north channel of the Yangtze estuary; vertical distribution of suspended sediment; Rouse formula

大尺度范围内的悬移质泥沙输运计算, 通常依赖于泥沙垂线分布的解析或半解析、经验或半经验公式, 因此构造合理的悬沙分布模式对于提高海岸泥沙运动的预测水平是十分有意义的。在平衡状态下, 悬沙的垂线分布主要取决于泥沙沉速、水流黏性及紊动形成的垂向扩散和波浪破碎等因素; 一般情况下, 以泥沙沉速、流动摩阻及卡门数表示的悬浮指标可以用来指数描述悬沙的垂线分布<sup>[1-3]</sup>, 无论是实验室及现场资料都吻合较好; 由于描述模型中的泥沙沉速选取较为关键,

是决定泥沙垂线分布规律及泥沙落淤强度的重要指标之一, 因而钟建军<sup>[4]</sup>及时钟<sup>[3,5]</sup>等利用悬沙垂线分布公式对于长江口细颗粒泥沙沉降速度进行了相关研究, 但对于计算出的沉速值差异较为明显, 拟合计算泥沙沉速往往远大于一般采用的以中值粒径为代表的理论单颗粒沉降速度或实验室内获取的静水沉速, 其中有现场动水沉速及盐絮凝聚等影响, 但其主要原因是现场选取平衡状态的水沙资料非常困难, 导致了拟合数据的误差加大。

本文在现场资料分析的基础上, 对不同季节

收稿日期: 2013-08-25

\*基金项目: 交通运输部科技项目(2011328A0670); 上海市自然科学基金(11ZR1415800)

作者简介: 顾峰峰(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事河口海岸水沙数值模拟方面研究。

和区域的长江口悬沙垂线分布特征进行分析, 尝试利用在Rouse公式基础上建立描述不平衡输沙的悬沙分布经验公式, 并通过实测资料率定验证其经验参数。

## 1 悬沙垂线分布特征描述

通常非平衡输沙情况下, 悬沙浓度相对于流速变化曲线有一个“滞后”效应, 这和底层泥沙浓度、泥沙的垂向扩散上扬的速度密切相关; 按传统的扩散理论, 可以确定上扬的通量, 即单位时间内穿过单位截面的扩散量应与浓度梯度成正比, 等于浓度梯度与扩散系数 $c_d$ 的乘积, 扩散系数通常认为和紊流的脉动相关; 在输沙平衡的情况下, 床面附近单位时间内穿过单位截面的上扬通量和沉降通量相等, 即:

$$\omega C_b + \varepsilon_v \left. \frac{dC_z}{dz} \right|_{z=\text{河床底部}} = 0 \quad (1)$$

式中:  $C_b$ 为近底含沙量;  $C_z$ 为垂向含沙量。实际上在潮流作用下式(1)的输沙平衡状态很难达到, 一般情况下, 在多年稳定地形上, 泥沙起悬及落淤过程可在某一周期( $T$ )内基本处于平衡状态, 满足式(2):

$$\int_T (\omega C_b + \varepsilon_v \left. \frac{dC_z}{dz} \right|_{z=\text{河床底部}}) = 0 \quad (2)$$

式(2)中, 近底含沙量的估算可利用泥沙垂向分布公式; 在平衡状态下, 描述悬移质垂线分布的罗斯(Rouse)公式如下:

$$c = c_a \left( \frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^r \quad (3)$$

对于长江口泥沙的不平衡输沙状态, 采用韩其为<sup>[6]</sup>建议的泥沙垂向扩散方程:

$$\alpha \omega c_b + \varepsilon_v \frac{dc_z}{dz} = 0 \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ 为不平衡输沙调整系数, 推导可得类似Rouse公式形式的泥沙浓度垂线分布公式:

$$c = c_a \left( \frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^R \quad (5)$$

式中:  $z$ 为垂线位置;  $h$ 为水深;  $a$ 为含沙量垂线参考位置;  $c_a$ 为参考含沙量;  $R$ 为悬浮因子。悬浮因子 $R$ 的计算表达式为:

$$R = \alpha \omega / (\kappa u_*^3) \quad (6)$$

式中:  $\alpha=1$ 时可描述理想的平衡状态; 卡门系数 $\kappa$ 通常取为0.4;  $u_*$ 为床底摩阻; 潮汐河口水深平均流速与潮流水力比降近似符合均匀流的规律, 床底摩阻计算表达式为:

$$u_* = \frac{\sqrt{g \bar{u} n}}{h^{1/6}} \quad (7)$$

式中:  $\bar{u}$ 为垂向平均流速;  $n$ 为Manning系数(约0.011);  $h$ 为包含潮位的总水深。

泥沙的扩散通常和水流的紊动紧密相关, 式(3)建立在泥沙扩散与湍流扩散系数近似相当的基础之上, 通常描述含沙量较低或近似平衡的悬沙状态; 当垂线悬沙处于较为明显的非平衡状态、存在较为明显的垂线泥沙通量交换时, 利用式(5)通过实测资料率定参数 $\alpha$ 可近似获取悬沙浓度的垂线分布。

## 2 长江口北槽悬沙垂线分布特征分析

为了解长江口北槽各测点位置(图1)的泥沙垂向分布情况, 取2007年8月实测资料, 在1d“两涨两落”的统计周期内, 把各测点垂向各层的平均泥沙浓度分布曲线绘制于图2。从图2可知, 北槽中、下段测点(包括CSW, CS3和CS7)底层的泥沙浓度较大, 存在相对明显的底层高浓度层, 其余测点的各层浓度差异较小, 底部高浓度泥沙运动特征不明显。通常情况下, 式(3)中 $\alpha$ 的取值通常较小, 但在底部泥沙浓度较高及厚度较大时, 会如前所述带来计算误差, 因此这里在计算底层含沙量时, 参考图2的垂向泥沙分布, 假设 $\alpha=0.8H$ , 并取此层含沙量值为参考含沙量 $c_a$ 。

由式(5)可知, 当 $R$ 可知, 则底部含沙量可知; 假定悬沙沉降速率沿水深恒定, 对类Rouse公式(5)等号两侧取自然对数, 可得:

$$\ln c = \ln c_a + R \left[ \ln \left( \frac{h-z}{z} \right) + A \right] \quad (8)$$

其中,  $A = \ln \left( \frac{a}{h-a} \right)$ , 当测点位置固定时, 同一时刻 $A$ 沿水深方向为常数, 绘制 $\ln c$ 与 $\ln \left( \frac{h-z}{z} \right)$ 的实测关系曲线, 见图3中散点,  $R$ 即为图中曲线斜率。从图3可以看出, 利用式(5)可以较好地描述现场实测资料。

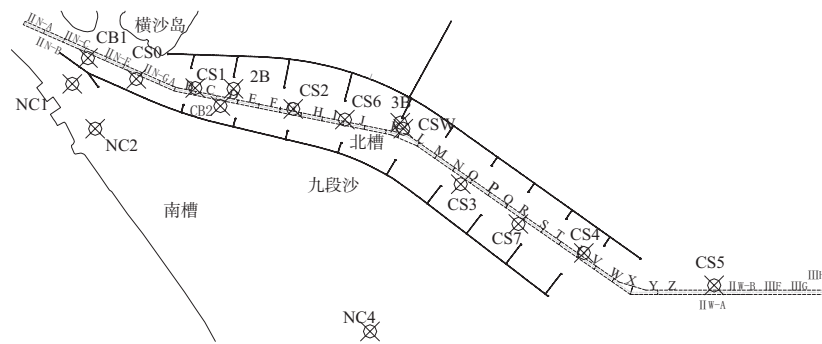


图1 测点及航道单元位置

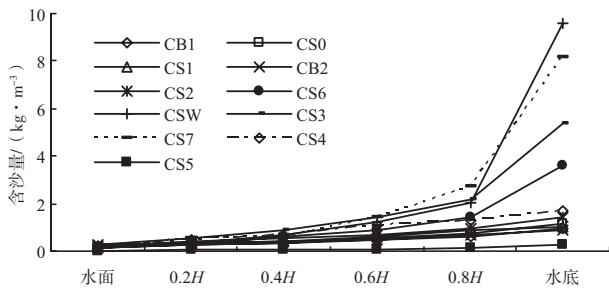
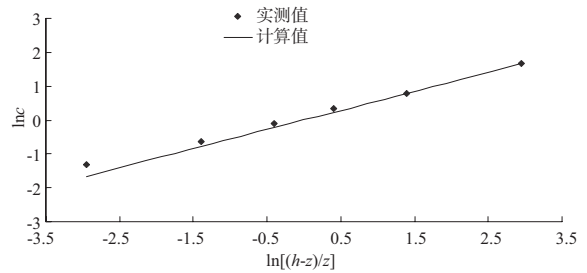
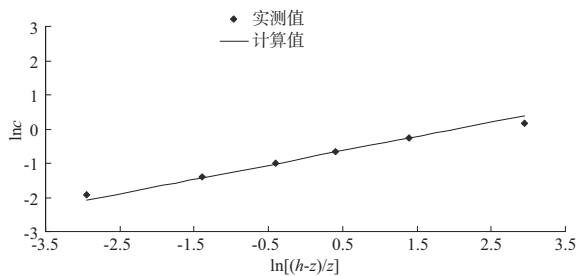


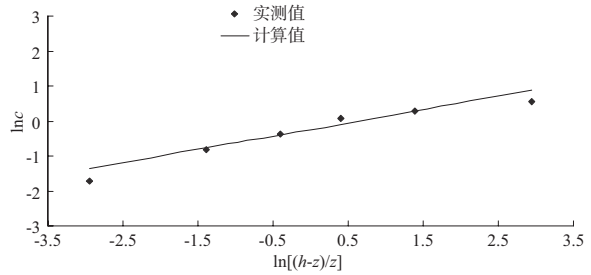
图2 北槽测点垂向各分层的平均泥沙浓度分布曲线



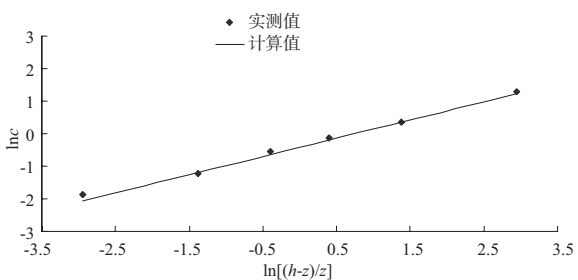
d) CS3



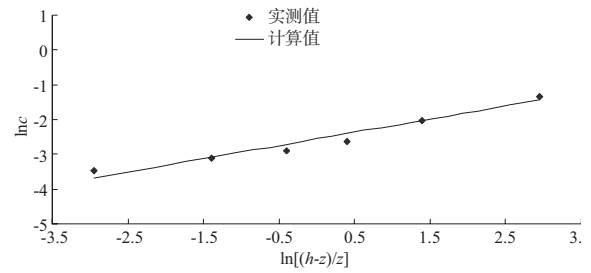
a) CS0



e) CS4

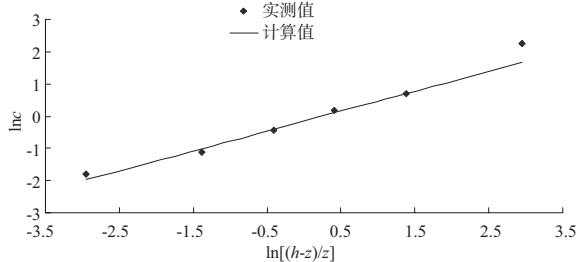


b) CS6



f) CS5

图3 悬沙浓度实测值及计算值分布



c) CSW

根据时钟等<sup>[3,5]</sup>推算沉速的类似方法,利用图3及选取2005年8月及2009年2月的资料进行泥沙沉速的推算,推算结果见图4,从结果来看其泥沙沉速的结果远大于北槽内悬沙对应的、一般认为的絮凝沉速,解释其原因,可能是北槽内泥沙在快速潮汐动力变化条件下,无法及时悬扬、沉降恢

复平衡状态导致其长期处于不平衡状态造成, 因而利用不平衡的垂线分布模型来描述长江口北槽的泥沙垂线分布更加合理。

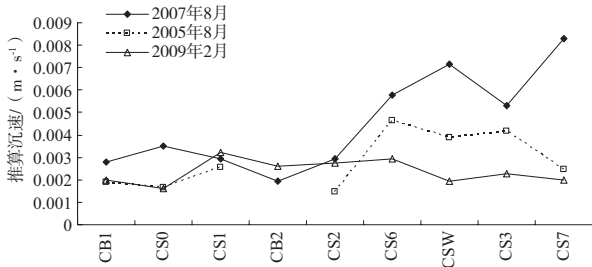


图4 北槽测点沉速推算结果

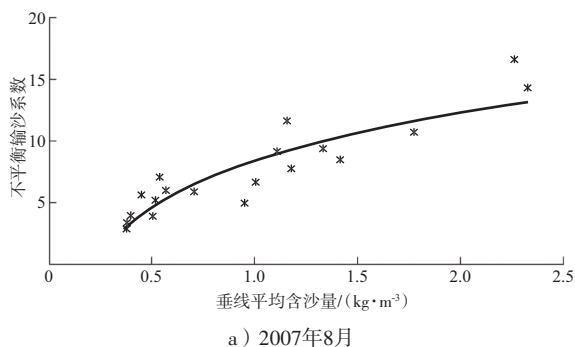
### 3 长江口北槽悬沙垂线分布经验公式的提出和验证

从图3,4可知, 利用非平衡条件下的类Rouse公式(5)同样可以描述长江口北槽内悬沙的垂线分布。当对悬浮因子R的计算表达式中的泥沙沉速 $\omega$ 按常规静水沉降试验进行估取(洪季选取絮凝估取当量沉速0.000 5 m/s), 在此基础上利用实测资料可以进一步率定和验证出不平衡输沙调整系数 $\alpha$ 。

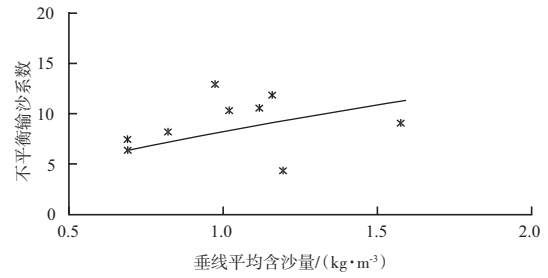
另外, 从图4及实测资料分析可知, 推算沉速较大的区域对应着较为明显的高含沙量, 因此本文假定了不平衡输沙调整系数 $\alpha$ 与含沙量的函数关系, 在实测资料的基础上对两者关系进行经验拟合。利用2007年8月洪季资料确定不平衡输沙调整系数 $\alpha$ 的计算结果见图5 a), 计算得到的不平衡输沙调整系数 $\alpha$ 的计算式如下:

$$A = 5.6 \ln \bar{C} + 8.4 \quad (9)$$

式中:  $\bar{C}$ 为垂线平均含沙量; 考虑枯季泥沙沉速约为洪季一半(0.000 25 m/s), 该表达式用来验证2007年2月枯季资料的结果见图5 b), 从两图拟合值(图中实线)与散点实测资料计算值的关系来看, 该式洪枯季都可适用。



a) 2007年8月



b) 2007年2月

注: 实线为式(9)计算值。

图5 不平衡输沙调整系数计算

基于上述数据及式(5)得到描述北槽洪、枯两季的泥沙垂线浓度分布差异公式如下:

$$c = c_a \left( \frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^{\frac{(5.61 \ln C + 8.4)\omega}{K\omega}} \quad (10)$$

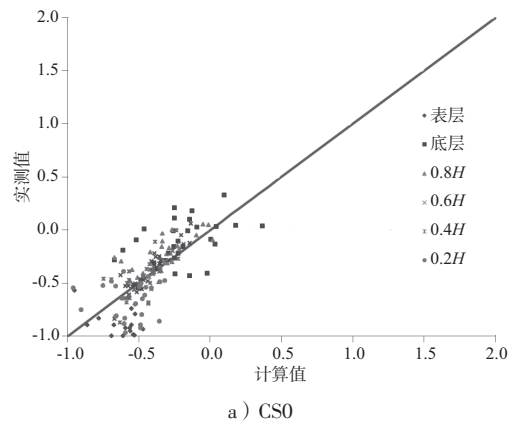
沿垂线积分式(6)和取参考含沙量 $c_a$ 的位置为6点法实测资料中的0.8H资料, 则参考含沙量与平均含沙量的关系如下:

$$c_a = \frac{h\bar{c}}{\int_{0 < z < h} \left( \frac{h-z}{4z} \right)^R dz} \quad (11)$$

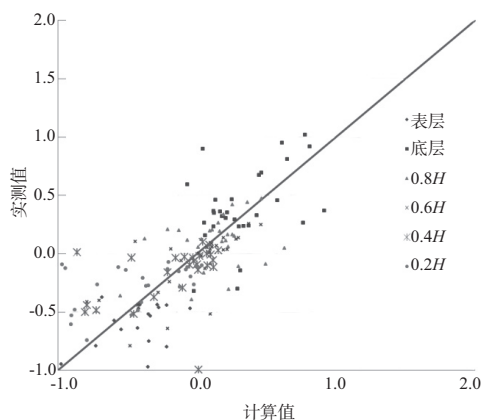
代入式(6)可得对应的北槽泥沙垂线浓度分布公式如下:

$$c = \frac{h\bar{c}}{\int_{0 < z < h} \left( \frac{h-z}{4z} \right)^R dz} \left( \frac{h-z}{4z} \right)^{\frac{(5.61 \ln C + 8.4)\omega}{K\omega}} \quad (12)$$

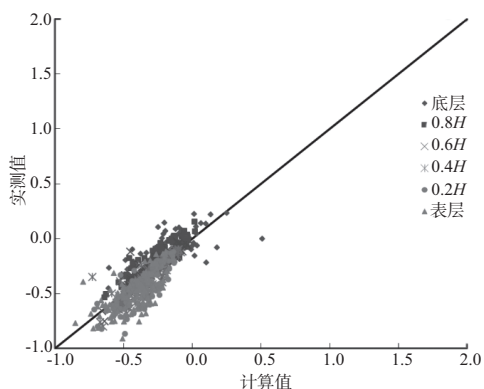
为了验证该垂线分布公式在长江口适用性, 取2010年8月洪季资料及2010年2月枯季资料进行验证。2010年8月洪季6点法实测资料和式(12)计算值比较见图6; 2010年2月枯季6点法实测资料和式(12)计算值分别取自然对数后比较于图7。从验证结果来看, 两者基本吻合; 现场如风浪、盐度以及现场实测条件影响这里并没有考虑。



a) CS0

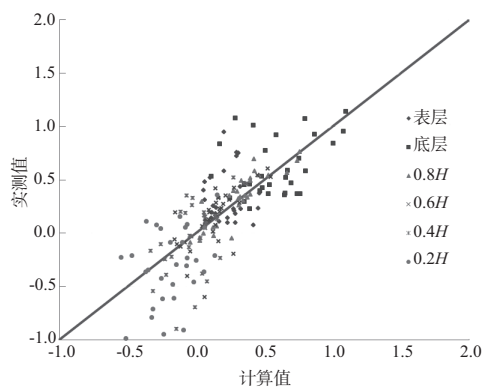


b) CS6

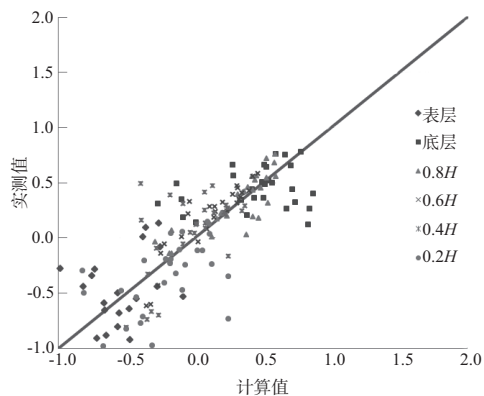


注：图上包含了测点CS1,CS3,CS6所有的分层数据。

图7 2010年2月实测和计算值验证比较



c) CSW



d) CS7

图6 2010年8月实测和计算值验证比较

#### 4 结语

1) 本文在长江口北槽实测资料分析的基础上, 描述和证明了悬浮泥沙垂线分布的Rouse公式在长江口描述悬沙分布是适用的。

2) 阐明了利用Rouse公式推算得到的不平衡条件下泥沙沉速的与实际泥沙沉速的差异, 并进一步提出不平衡输沙条件下的类Rouse公式描述长江口悬沙分布更加合理。

3) 利用洪枯季多次的实测资料, 验证、率定了不平衡输沙条件下悬沙经验公式中的不平衡输沙系数和垂线平均含沙量的经验关系式, 该公式洪枯季均可适用; 在此基础上, 建立了适用描述长江口北槽悬沙垂线分布的经验公式, 并通过实测资料得到了验证。

#### 参考文献:

- [1] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [2] 李艳红, 范宝山, 许韶华. 对悬移质含沙分布Rouse公式沿垂线积分的研究[J]. 东北水利水电, 1999(8): 22-23.
- [3] 时钟, 朱文蔚, 周洪强. 长江口北槽口外细颗粒悬沙沉降速度[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 18-23.
- [4] 钟建军, 匡翠萍, 陈思宇. 长江口黏性细泥沙有效沉速与相关因素的关系[J]. 人民长江, 2008 (20): 45-46.
- [5] 时钟. 长江口北槽细颗粒悬沙絮凝体的沉降速率的近似估算[J]. 海洋通报, 2004, 23 (5): 51-58.
- [6] 韩其为. 不平衡输沙含沙量垂线分布研究[J]. 水科学进展, 2010(4): 51-60.

(本文编辑 武亚庆)