

长江口粘性细颗粒泥沙沉降规律*

周华君 任汝述

(水港系; 630074) (南京: 河海大学; 210024)

摘 要

本文采用垂向浓度分布解析解拟合实测含沙浓度剖面的方法, 确定了长江口的动水沉速, 并对方法的合理性进行了详细的分析. 结果表明, 动水沉速取决于含沙浓度和床面剪切应力. 根据现场数据获得的动水沉速大约比实验室结果大一个量级.

关键词: 动水沉速; 粘性细颗粒泥沙

0 引 言

河口粘性细颗粒泥沙主要是以悬移质形式搬运的. 决定悬沙运动特性的物理过程主要是: 侵蚀、对流扩散和沉降. 沉降是泥沙颗粒受粘滞阻力和重力作用以及粒间相互作用影响的颗粒垂直运动分量. 粘性泥沙的沉降特性影响了沉积速率和悬沙垂直分布. 沉降特性可用泥沙沉降速度作为定量指标来表示.

沉速通常定义为静水中的沉降速率. 粘性细颗粒泥沙通常以絮团形式存在. 絮团主要是由众多微小的粘土颗粒聚结起来而形成的密度、大小和剪切强度可变的松散凝聚体. 凝聚作用使得沉速的确定显得很不可靠. 凝聚作用取决于含沙浓度、泥沙及流体特性和局部紊动. 所以粘性泥沙的沉降速度是悬浮体的特性, 而不仅仅取决于泥沙性质. 尽管原始颗粒的沉速随其粒径的减小而迅速减小, 但由于原始颗粒粒径越小, 凝聚作用越强, 凝聚团的沉速当量粒径只与原始粒径的 0.03~0.05 次幂有关^[1,2].

任何影响凝聚团粒径、密度和剪切强度的物理化学因素也都对沉降速度有影响. 海岸和河口区泥沙沉速有较宽的范围, 文献报道的值从 10^{-4} 一直到 10^1 mm/s^[1,3], 沉速的可变性不仅反映在不同河口之间, 也反映在某一特定河口的不同区域. 对于给定性质的泥沙, 影响沉速最重要的因素是悬沙浓度、流场和水体物理化学性质. 一般说来, 沉速随浓度增加而增加, 但当浓度达到 $5\sim 10$ kg/m³ 以上时, 沉速随浓度增加而减小, 即产生了受阻沉降. 在受阻沉降阶段, 泥沙形成一个几乎连续的网状结构, 空隙水通过网状结构缓慢地向上流出, 以使沉降继

* 本文收到日期: 1993-12-24. 周华君, 男, 31岁, 博士

** 水电部水利水电科学基金资助项目

续进行. 以受阻沉降为特性的高浓度悬浮沙体, 通称之为浮泥 (Fluid Mud).

确定沉速一般有四种方法. 第一种是室内沉降筒试验方法; 第二种是通过测定水槽中淤积率来估计沉速; 第三种是用现场沉降管 (如欧文管 Owen tube) 直接从河口水柱中取得“未扰动”的水样进行沉降试验; 第四种是用解析解拟合原型的悬沙浓度——深度剖面. 也就是匹配法或者扩散方程反求方法, 反求法在满足解析解的前提假定条件下, 可得到满意的结果^[4]. 本文采用扩散方程反求法, 在整理长江口大量实测浓度剖面资料的基础上, 得到适合于长江口的沉速规律.

1 扩散方程反求法的理论分析

1.1 扩散方程的罗斯 (Rouse) 解

在流动水体中, 悬沙质量平衡可以用描述悬沙浓度对流、扩散和冲刷沉降过程的偏微分方程, 即泥沙扩散方程表示. 在稳定和均匀流条件下, 泥沙扩散方程表示为:

$$c(W_s - W) + \varepsilon_z \frac{dc}{dz} = 0 \quad (1)$$

(1) 式中, c = 悬沙浓度; z = 垂直坐标; ε_z = 垂向泥沙质量扩散系数; W_s = 泥沙静水沉速; W = 垂向速度分量; 定义 $W_d = W_s - W$ 为动水沉速, 或称有效沉速, 而静水沉速 W_s , 是泥沙在静止清水中的沉降速度. 动水沉速概念, 在均匀流条件下, 说明了由于泥沙沉降排出的流体导致的垂直回流. 在均匀流条件下, 含沙量较小时, $W_d \approx W_s$, 但在高含沙情形, 这种影响很大.

扩散现象中的扩散系数与动量交换系数相当, 在剪应力随深度线性分布和流速呈对数分布的假定下, 可得到抛物型分布的扩散系数.

$$\varepsilon_z = \beta k \mu_* h \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (2)$$

β 为泥沙交换系数与动量交换系数的比值. 在细颗粒泥沙情形 $\beta \approx 1$. 将 (2) 式代入 (1) 式, 利用底部边界条件 $C|_{z=0} = C_a$, 在任意参考面 a 和 z 之间积分可得到平衡含沙分布

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a}\right)^{2^*} \quad (3)$$

这就是著名的扩散方程罗斯解. 其中 $z^* = \frac{W_d}{k u_*}$ = 悬浮指数; k 为卡门常数; u_* 为摩阻流速; h 为水深. 参考面通常取离床面 2 倍粒径或 0.05 h . 用理论分布 (3) 式拟合实测分布可确定悬浮指数 z^* , 从而确定动水沉速 W_d .

从上面过程可以看出, 由扩散方程反求法得到的是动水沉速.

1.2 反求法的适用性分析

河海大学环形水槽动水沉降试验表明, 细颗粒泥沙含沙量垂线分布符合扩散方程的罗斯解^[5]. 费特尔 (Vetter) 对各种分布形式进行比较分析, 得出对于细颗粒泥沙, 用罗斯分布来描述垂直含沙量分布, 具有足够的精确度^[6]. 对于长江口这种宽浅河口, 由于水深浅, 紊动强, 泥沙的水平对流过程, 对垂线含沙量分布的影响远小于垂向紊动扩散的影响, 此时泥沙垂线含沙量分布的剖面形式主要取决于垂向扩散过程. 考虑二维悬沙对流扩散方程

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z}(W_d c) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) \quad (4)$$

方程中各项的重要性可用量级比较来分析。设流动的特征尺度定义如下：

L = 水平方向长度尺度；

H = 垂直方向长度尺度；

T = 时间尺度；

U = 流速尺度；

E = 垂直扩散系数尺度。

将 $t, x, z, u, \varepsilon_z$ 无因次化后，方程 (4) 成为：

$$\frac{H}{W_s T} \frac{\partial c}{\partial t'} + \frac{HU}{LW_s} \frac{\partial(u'c)}{\partial x'} = \frac{\partial c}{\partial z'} + \frac{E}{W_s H} \frac{\partial}{\partial z'} \left(E' \frac{\partial c}{\partial z'} \right) \quad (5)$$

(5) 式中用 (') 标记的量是用相应的尺度 ($u = Uu'$, $z = Hz'$, $\varepsilon_z = EE'$) 无因次化后的量。

罗斯解是在恒定均匀流条件下得到的平衡浓度解，所以， W_s 的近似解要求方程 (5) 式满足①：

右边两项有相同量级；②：左边两项的量级要小于右边两项的量级，即

$$\frac{E}{W_s H} \sim 1 \quad (6)$$

$$\frac{H}{W_s T} \sim \frac{HU}{LW_s} \sim \delta, \delta \ll 1 \quad (7)$$

取长江口的特征水深 $H = 10$ m；特征流速 $U = 1.0$ m/s；沉速 $W_s = 0.0035$ m/s； $E = 0.1U_* H =$

$U/30$ m²/s，在纵向上较大的含沙量峰与谷的距离约 20 km ~ 30 km，取特征长度 $L = 20$ km。比

较大的含沙量峰在一个潮周期中一般出现 2 次，取 $T = 6$ h。将上述数据代入 (6)，(7) 式，得

$$E/(W_s H) = 0.95$$

$$H/(W_s T) = 0.13 \ll 1$$

$$HU/(LW_s) = 0.14 \ll 1$$

所以，以上满足扩散方程反求法的条件，说明长江口含沙量垂线分布形式接近于均匀流中平衡含沙量分布形式，满足方程 (3)。长江口实测资料也与此相符 (图 1)。

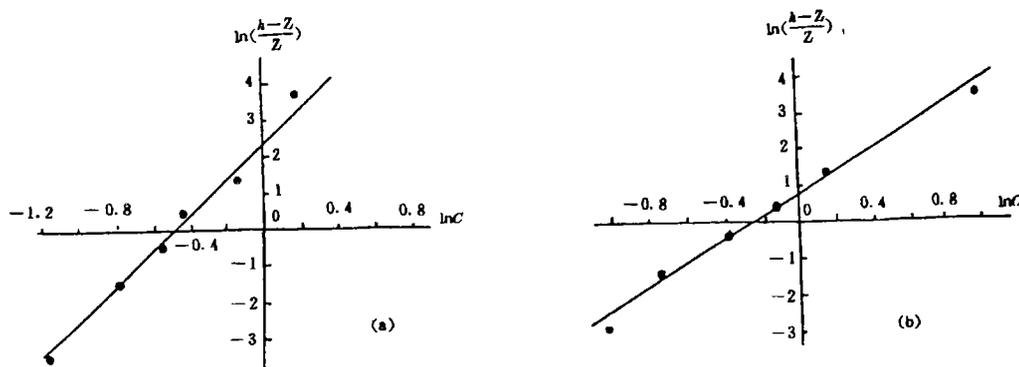


图 1 现场实测含沙量垂向分布与解析模型比较

(a): 垂线平均含沙量 $\bar{C} = 0.64$ kg/m³；水深 $h = 13.8$ m；垂线平均流速 $U = 0.46$ m/s；盐度 $S = 0$ ；

(b): $\bar{C} = 0.84$ kg/m³； $h = 7$ m； $U = 0.77$ m/s， $S = 14.5$ ‰

考虑到河口水流的非恒定性质，可采用浓度剖面的相似性假定^[7]，即浓度垂线分布形式为平衡分布 (3) 式，浓度随时间变化的影响则反映在临底浓度 c_b 的变化上，即

$$\frac{c(z,t)}{c_a(t)} = \left(\frac{h-z}{z}\right)^{2.2} \left(\frac{a}{h-a}\right)^{2.2} \quad (8)$$

上式表示，每一时段都可作为恒定情况处理，在长江口水流动力随时间的连续变化中，泥沙剖面分布也在连续调整过程中，大部分时间处于一种动态准平衡状态。

2 长江口泥沙沉降规律分析

根据长江口实测流速、盐度和含沙量资料，选择其中含沙量点据与均匀流平衡含沙量罗斯分布吻合较好的垂线，由扩散方程 (3) 来反求动水沉速 W_d 。分析整理表明，动水沉速与垂线平均含沙量 \bar{C} 和底部切应力 τ_b 明显相关。图 2 为盐度在 1%~20% 时 W_d 与 \bar{C} 和 τ_b 的关系。

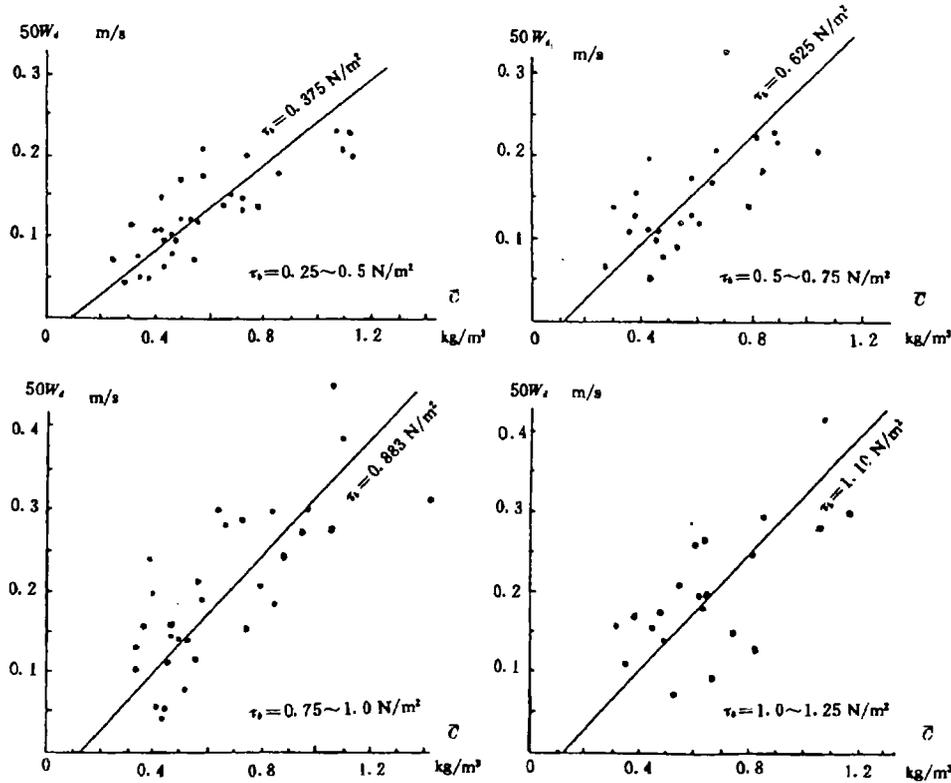
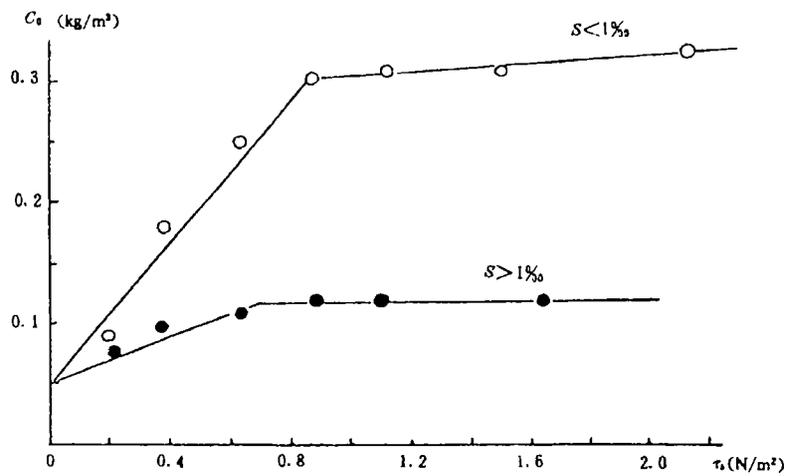
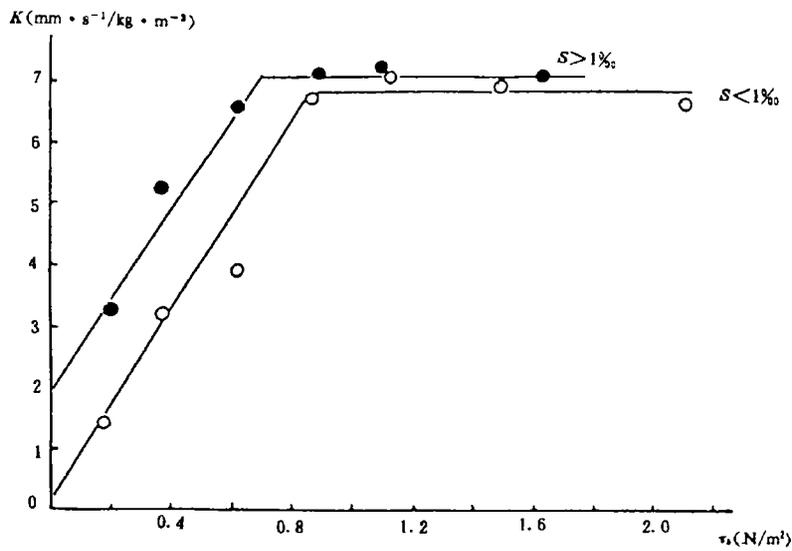


图 2 动水沉速 W_d 与含沙量 \bar{C} 、底部切应力 τ_b 的关系 (盐度 > 1‰)

W_d 与 \bar{C} 的关系可用下式表示：

$$W_d = K(\bar{C} - C_0) \quad (9)$$

K 表示含沙量变化对沉速的影响率； C_0 为紊动水流中的不沉含沙量。 K 和 C_0 与切应力有关。其变化规律如图 3、图 4。随着 τ_b 的增大，一开始 K 值和 C_0 值相应增大，表明紊动加强了颗粒碰撞频率和凝聚作用，使含沙量变化对沉速的影响率 K 增加，以及水流紊动增强导致不沉含沙量 C_0 增加。 C_0 这部分泥沙具有类似冲泻质，或中性悬浮质的性质。随着 τ_b 的继续增大， C_0 和 K 值趋于稳定。泥沙沉速还与盐度 S 有关，当 $S > 1‰$ 时，动水沉速与盐度无明显关系，图 2 中不同盐度的点据相互混杂。但 $S < 1‰$ 与 $S > 1‰$ 的情况有明显差别 (图 3、图 4)，表明了盐度絮凝使动水沉速增大的趋势，说明长江口大体上以 1‰ 盐度为界，形成了两个规律不同的沉降区。

图3 C_0 与 τ_b 关系图4 K 与 τ_b 关系

在 $S < 1\text{‰}$ 的区域

$$\begin{cases} C_0 = 0.05 + 0.287\tau_b & (\tau_b \leq 0.87\text{N/m}^2) \\ C_0 = 0.279 + 0.024\tau_b & (\tau_b \geq 0.87\text{N/m}^2) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} K = 0.10 + 7.816\tau_b & (\tau_b \leq 0.87\text{N/m}^2) \\ K = 6.90 & (\tau_b \geq 0.87\text{N/m}^2) \end{cases} \quad (11)$$

在 $S > 1\text{‰}$ 的区域

$$\begin{cases} C_0 = 0.05 + 0.096\tau_b & (\tau_b \leq 0.7\text{N/m}^2) \\ C_0 = 0.113 + 0.005\tau_b & (\tau_b \geq 0.7\text{N/m}^2) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} K = 1.90 + 7.429\tau_b & (\tau_b \leq 0.7\text{N/m}^2) \\ K = 7.10 & (\tau_b \geq 0.7\text{N/m}^2) \end{cases} \quad (13)$$

本文根据现场实测资料得到的长江口泥沙沉速在2~5 mm/s左右,较室内试验结果大一个量级.类似情况在其它文献中也有报导^[3].造成这种差异的原因可能是天然河口絮团有较长的时间保持在主流区中.主流区内的剪切率远小于近底边界层的剪切率.因而,絮团成长比较充分,沉速也大^[8].絮团沉速与河口环境有很大关系,但在实验室中,很难模拟这些环境.特别是水深和紊动的影响.

沉速应由现场实测,但目前现场采用的沉速测量方法仍有许多问题需要解决.比如,欧文管中紊动衰减是否会导致额外絮凝;沉降管尺度的影响,巨絮团的破裂等.用浓度剖面反求沉速不受诸如絮团破坏,尺度限制和紊动场的正确模拟等因素的限制,但其适用性受到扩散方程分析解的前提条件的限制,而实验研究,有助于寻求沉速变化的基本规律.

3 结 语

对于长江口这种宽浅河口,垂线含沙量分布主要取决于垂向扩散过程,含沙量分布形式接近于均匀流的平衡含沙量分布.用解析拟合实测含沙量垂向剖面的方法得到的长江口动水沉降规律,很好地反映出含沙浓度和床面切应力这二个最基本的制约因素.研究结果还表明,盐度大于1‰的盐淡水混合区的沉速大于盐度小于1‰区域的沉速.以盐度1‰为界,长江口形成了两个不同规律的沉降区.根据现场资料反求的动水沉速要比实验室结果大一个量级.

细颗粒泥沙沉降特性受多种因素控制,还有许多问题需要解决.如非恒定潮汐水流中絮团的破坏和再絮凝;在憩流时,最大混浊带的迅速衰减;有机质凝聚作用的定量分析;大絮团的沉速;絮团粒径谱等等.值得注意的是,用现场直接测量方法测定沉速(如水下摄影),不干扰絮团,可望得到满意的结果.

参 考 文 献

- 1 Mehta A J et al (1989) Cohesive sediment transport. I: process description. *J. Hydr. Engrg, ASCE*; 115 (8): 1076-1093.
- 2 Yen Kai, Ren Rushu, Zeng Xiaochuan (1989) Some sediment problem of silty coast and estuaries. in *Fourth International Symposium on River Sedimentation, Beijing China*; 1: 754-761, China Ocean Press.
- 3 Van Leussen W. (1988) Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs; A review. in *Physical Processes in Estuaries*, edited by J. Dronkers and Van Leussen, Springer Verlag, New York, 347-403.
- 4 Mehta A J (1986) Characterization of cohesive sediment properties and transport. in *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, A. J. Mehta, ed., *Lectures Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol 14*, Springer-Verlag, Berlin, FRG.
- 5 Ren Rushu, Zeng Xiaochuan (1987) Investigation on the hydrodynamic behavior of the cohesive sediment in Yangtze Estuary. in *1987 Proceedings of Coastal and Port Engineering in Developing Countries*, 2: 1465-1477.
- 6 Vetter M (1985) Comparison of different theories for the vertical distribution of suspended sediment concentration with measurements. in *Euromech 192: Transport of Suspended Solids in Open Channels.*, Neubiberg, 75-79.
- 7 Otsubo K, K. Muraoka (1988) Field observation and simulation of sediment resuspension in a shallow lake. *Wat. Sci. Tech.* 20 (6/7): 263-270.
- 8 Odd N V M (1988) Mathematical modelling of mud transport in estuaries. in *Physical Processes in Estuaries*, edited by J. Dronkers and Van Leussen, Springer-Verlag, New York, 503-531.

Settling Behavior of Cohesive Sediment in Changjiang Estuary

Zhou Huajun

Ren Rushu

(Department of Channel and Harbour Engineering) (Hohai University, Nanjing)

Abstract

The effective settling velocity in Changjiang estuary is determined by matching the analytical model of vertical concentration profiles to measured profiles. Detailed analyses for the validity of the method are made. It is shown that the effective settling is a function of concentration and bed shear stresses. The settling velocity based on measured data is about an order of magnitude larger than that derived from laboratory data.

Key words: effective settling velocity; cohesive sediment