

长江口悬沙沉速室内试验研究

万远扬^{1,2}, 吴华林¹, 沈 淇¹, 顾峰峰¹

(1.上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 2. 联合国教科文组织水教育学院, 代尔夫特 2601DA, 荷兰)

摘要: 在充分认识传统沉降筒缺陷的基础上提出了“大型可温控自动搅拌沉降试验筒”。通过室内系列试验发现: (1)含沙量对长江口细颗粒沉降速度影响最大; (2)温度上升, 沉速增加, 但不同阶段影响程度有所不同; (3)含沙量越高, 盐度对沉速的影响越小, 含沙量相同情况下, 长江口北槽悬沙枯季水温下盐度对沉速的影响在 1.8~5.7 倍左右; 洪季水温下盐度对沉速的影响在 1.5~2.2 倍左右。 (4)枯季最佳絮凝盐度在 7 左右, 最佳絮凝含沙量为 7 kg/m^3 ; 洪季最佳絮凝盐度在 10~12 左右, 最佳絮凝含沙量为 4.5 kg/m^3 。本研究成果可望加深我们对细颗粒泥沙动力过程相关机理的认识, 同时可为相关港口、航道的淤积机理分析, 数学模型、物理模型研究工作提供一定技术参考。

关键词: 长江口; 细颗粒泥沙; 沉降速度; 沉降筒

中图分类号: TV856

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2015)08-0078-08

doi: 10.11759/hyxx20130721002

根据钱宁^[1]、van Rijn^[2]对泥沙沉速的定义, 泥沙沉速为单颗粒泥沙在静止的清水等速下沉时的速度; 而美国陆军工程兵团(US Army)编写的《工程手册》^[3]中对泥沙沉速的定义: 在无限深度静止的、水温为 24°C 的纯净水中, 密度为 $2\ 650 \text{ kg/m}^3$ 球形单颗粒在下降过程中达到一个稳定沉降时的速度为颗粒的沉速。

对于细颗粒泥沙(一般中值粒径小于 $62 \mu\text{m}$)来讲, 上述标准定义存在一定商榷空间。前人通过大量的理论分析^[1, 4]、数学模型^[5]、室内试验^[6-7]、现场观测^[8-9]等研究表明, 当天然非均匀泥沙中黏性成分(粒径小于 $4 \mu\text{m}$)占一定比例(这个具体的比例值随着沙的化学组成以及不同的地域等都可能发生变化)后, 泥沙的沉降特性会发生显著而复杂变化: (1)在标准定义中的单颗粒已经没有意义, 其絮凝群体特性占绝对优势, 且细颗粒泥沙不像粗颗粒那样放入沉降筒内可以分辨得出来, 单个细颗粒即难以从沙样中取出, 入水后也非常难以分辨; (2)水温、水质、盐度、含沙量、紊动强度等环境对沉降速度有着重要的影响, 清水或者纯净水中的沉速参考价值不大; (3)由于细颗粒泥沙沉降的环境敏感性, 等速沉降过程难以达到。

此外, 对于实验室测量沉速(静水沉速)与现场沉速(动水沉速)间的关联性详细分析可见文献^[10]。根据前述经典定义, 泥沙沉速属于某种泥沙的特有静力学属性。动水沉速这个概念把所有因素导致的泥沙向下运动的速度看成了沉降速度, 把由于水流

紊动等导致的垂向速度的改变也当成是泥沙自身的基本属性。这会导致基本概念的混淆, 同时也会使得对细泥沙动力过程的理解复杂化。综合来看, 室内试验是确定不同细颗粒泥沙在不同环境和条件下沉降速度较为理想的方法。

细颗粒泥沙沉降速度问题是认识细颗粒动力过程重要的参数之一, 该参数不仅决定着数学模型的表现能力, 更是我们认识水下泥沙运动和地貌演变的核心因子。本文在大量文献调查和充分认识传统沉降筒缺陷的基础上提出了“大型可温控自动搅拌沉降试验筒”, 并对相关试验方法进行了若干改进。在此基础上, 本研究以含沙量、盐度、温度为影响因了, 探索了它们对细颗粒泥沙沉降速度的影响, 并提出了一个新的长江口悬沙沉降速度经验公式。本研究成果可望加深我们对细颗粒泥沙动力过程相关机理的认识, 同时可为相关港口、航道的淤积机理分析, 数学模型、物理模型研究工作提供一定技术参考。

1 试验介绍

本试验研究主要是在对细颗粒泥沙沉降特性、沉速测量方法、计算公式等分析和初步认识的基础

收稿日期: 2013-07-21; 修回日期: 2013-11-26

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAB12B03); 国家自然科学基金(41206072)

作者简介: 万远扬(1981-)男, 湖北荆州人, 副研究员, 博士, 主要研究河口泥沙动力学, 电话: 021-68909900-243, E-mail: sway110@qq.com

上^[10], 针对长江口北槽悬沙开展沉降特性试验, 分析沉速与含沙量、盐度、温度等因子的敏感性, 并尝试建立适合长江口的悬沙静水沉速计算经验公式。下面将分别从试验装置、代表沉速计算方法、水样沙样的选取、仪器的率定来介绍试验情况。为保证试验结果能适应于长江口的实际情况, 本次试验所用悬沙样和不同盐度值的海水样均直接选取于长江口北槽现场, 而非来自自来水或者海水与自来水的混合。

1.1 试验设备

以往室内沉降试验多采用的是沉降池或者沉降筒^[1-2], 经调研分析和实际操作, 传统的多层重复取水样的沉降筒的主要不足之处体现在: (1)由于只能取固定间隔的水样, 这样获得的垂线含沙量精度有限, 无法准确获取连续的垂线剖面及含沙量变化拐点, 这样在利用泥沙连续性方程反算沉速时会导致误差较大; (2)当含沙量较高时, 由于边壁效应, 所取

水样含沙量一般要小于实际值; (3)以往沉降筒测量泥沙浓度时, 多采用比重瓶或者烘干法来测量含沙量, 当泥沙颗粒较细、含沙量较小时误差较大; (4)含沙量取样及测量过程十分繁琐、耗时, 这样也会导致每一轮取样时间都较长, 影响取样时间步长及沉速反算的精度; (5)多层取样过程中难以保证取样的同步性, 取样的次数也不能太多, 否则会导致水量损失过多, 影响静水沉降过程。

本次沉降试验采用“中心”自主设计开发的大型可温控自动搅拌沉降试验筒(图 1)。沉降筒内搭载有小型浊度计、水位计、小型高浓度(密度)测量设备—音叉、自动升温保温设备及高压空气搅拌装置等。本装置与传统的沉降筒对比, 其主要优势体现在: (1)搭载先进的声学光学含沙量测量仪器, 测量的精度高、测量泥沙浓度的范围广, 可同时测量沿垂线的连续浓度值; (2)内径大, 可保证先进测量仪器在测量过程中对水体干扰较小; (3)操作方便, 水温、盐度、水深、初始含沙量等参数均可方便地进行调节。

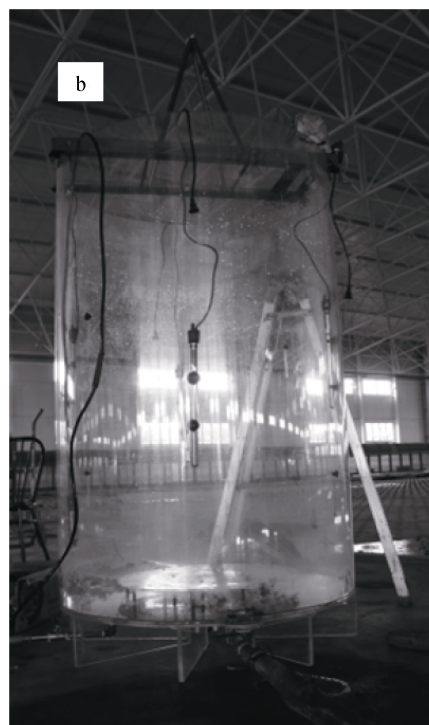
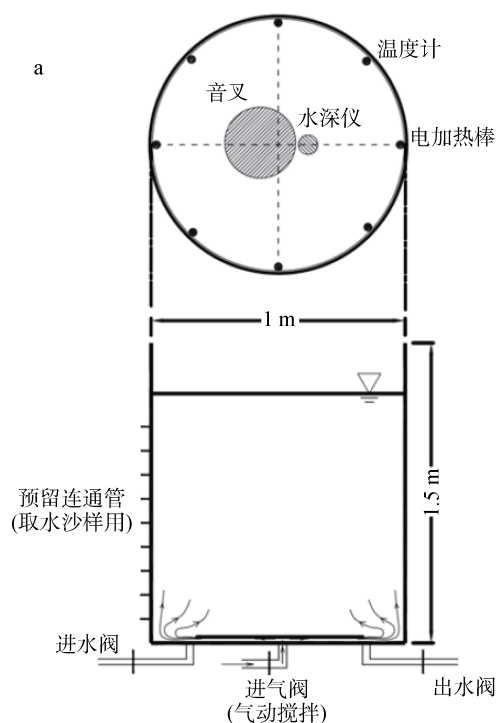


图 1 大型可温控自动搅拌沉降试验筒

Fig. 1 The new apparatus for measuring fine sediment settling

a. 试验装置示意图; b. 实物照片

a. Configuration of the settling column; b. Photo of the settling column

1.2 试验流程

泥沙沉降试验的主要流程如下。

(1) 首先向沉降筒内注入北槽现场取得的含盐

水, 至水深约为 1.2~1.3 m 后, 加入一定量的高浓度悬沙样, 充气搅拌均匀, 测量一个垂线的初始含沙量, 若低于预设值, 再加入沙样并搅拌后再次测量,

循环往复,直到接近预设泥沙浓度值;

(2) 打开主、辅加热器加热,并随时监控各探头温度,如出现一定温差则打开充气设备搅拌,直到接近预设温度值,再关闭主加热器,单开辅助加热器保持沉降筒内温度不变。

(3) 待筒内温度到达设定值,且各探头监测值显示桶内温度较均匀时,再次打开充气搅拌设备,利用高压空气搅拌 2~3 min,以充分混合。

(4) 停止搅拌 1~3 min 后,开始逐时测量桶内垂线泥沙浓度,初始测量时间间隔一般为 3~5 min,1~2 h 后测量间隔逐渐延长,最终获取一组预设初始含沙量和温、盐条件的静水沉降过程中的垂线浓度随时间变化的过程图。

(5) 在(4)的测量数据基础上,计算该条件下的泥沙群体沉速。

1.3 沉速计算方法

非均匀天然细颗粒泥沙的群体沉速一般很难直接观测得到。实验室内一般通过含沙量垂向分布来反推沉速,即 McLaughlin 公式推算法^[6, 11],或称累计重量法,其主要通过泥沙垂线连续方程积分推导而来。

根据沙量连续方程式可得:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \omega S}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

对水深 z 积分得,

$$(\omega S)_{z=h} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h S dz \quad (2)$$

式中 S 为含沙量, ω 为瞬时沉速, h 为水深, t 为沉降时间, z 为沉降距离。

通过测定不同沉降历时沿水深 h 的含沙量分布,运用图积分或有限差分法,即可求出不同水深 h 处瞬时沉速随沉降历时 t 的变化,但该值随水深和时间而变,不便于实际应用。因此提出了一个中值沉速的概念或者叫群体沉速,一般以含沙量达到初始含沙量的 50% 时的沉降历时 $t_{50\%}$ 内的平均值,得水深 h 处的断面平均沉速即为群体沉速:

$$(\omega_{50\%})_{mc} = \frac{1}{t_{50\%}} \int_0^{t_{50\%}} \omega_i dt \quad (3)$$

式中 $\omega_{50\%}$ 为群体沉速, ω_i 为瞬时沉速, $t_{50\%}$ 为瞬时含沙量的值为初始含沙量 50% 时的沉降历时。

McLaughlin 公式类似于欧拉法,它求出的是整个沉降期间通过各固定断面的各级颗粒的断面平均沉速,中值沉速计算方法较为简单,计算值属群体沉

速(中值沉速),表示非均匀沙 50% 颗粒已经完成沉降时所对应的速率(沉降半衰期),其概念类似 d_{50} ,其物理意义较强,较适用于细颗粒泥沙沉速的推算。

下面将以某组试验结果为例,来详细解释沉速计算方法和过程。

(1) 首先直接得到的是不同时刻沉降筒内的含沙量剖面(图2),其中百分比含沙量是指各时刻含沙量与初始时刻含沙量的比值。

(2) 根据图2,利用 McLaughlin 公式就可计算不同水深处、不同时刻的瞬时沉速(图3)。

(3) 根据图3,利用群体沉速计算公式就可计算不同水深处的群体沉速(图4)。

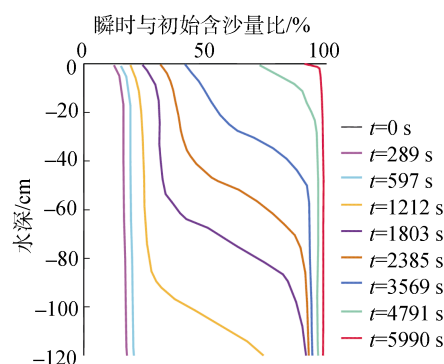


图2 不同时刻瞬时含沙量剖面图

Fig. 2 The vertical suspended sediment concentration (SSC) profile during the settling processes

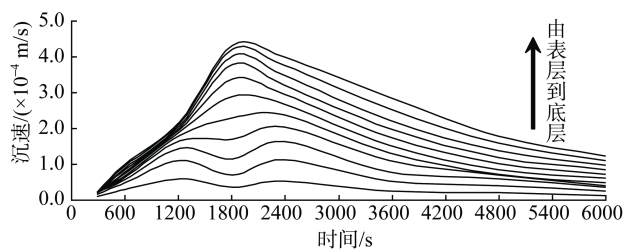


图3 沉降过程中不同垂线位置的瞬时沉速

Fig. 3 The dependency of depth and time on instant settling velocity

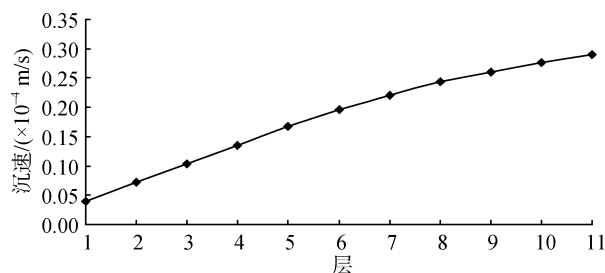


图4 群体沉速与沉距的关系图

Fig. 4 The relationship between group settling velocity and settling distance

(4) 根据泥沙垂线连续方程, 在重力作用下, 泥沙沉速应是含沙量和沉降距离的函数, 对于非黏性沙, 单颗粒泥沙在静水中由于受到水的阻力和重力的共同作用, 一般在百分之几秒(一般距离 1 cm 以内)就能达到均匀沉降; 对于细颗粒泥沙, 由于泥沙颗粒在下降过程中受到其它因子的影响较大, 在整个沉降过程中一般很难出现均匀沉降阶段, 其瞬时速度一直处于不断变化之中; 实际上, 沉距对沉速的影响也包含了其它影响因子(主要是含沙量)的作用, 其直接贡献难以简单剥离。细颗粒泥沙的非等速沉降过程使得其代表沉速的选取十分困难。在研究中, 为同一化比较不同影响因子对沉速的影响, 取底层(如图 3 中第 11 层)的群体沉速代表该组沙的代表沉速。

1.4 试验组次

根据计划安排, 本研究主要开展枯季、洪季水温条件下盐度(0, 5, 7, 10, 15, 20)和含沙量(0.6~18 kg/m³)对泥沙沉速影响的试验。试验组次汇总见表 1。其中洪、枯季节的代表水温是根据牛皮礁站多年 8 月和 2 月平均水温确定的。

表 1 试验组次总表

Tab. 1 The experiment arrangements

试验	盐度	含沙量 (kg/m ³)	温度 (°C)	试验 组数
变温试验	7	1, 4.5	14~30	18
枯季试验	0, 5, 7, 10, 15, 20	0.6~25	7	67
洪季试验	0, 5, 7, 10, 12, 15, 20	0.5~18	27	86

1.5 预备试验

在前人的相关试验中, 对于试验水样的选择大多较为模糊, 有的选择自来水, 有的选择合成(人工)海水, 有的选择纯净水, 为弄清楚不同水样对沉速的影响, 我们开展了水样代表性的预备试验。

在本次预备试验中, 为弄清楚不同水样对沉速的影响, 我们选取了 3 种不同的、盐度都为 0 的水样(纯净水、自来水和长江口现场天然水)进行对比性试验(试验水深为 1.4 m, 水温为 27 °C, 初始含沙量均约为 1.5 kg/m³), 试验结果见图 5。由图可见, 3 种不同水样沉速差异较大, 尤其是纯净水情况时, 与其它两者沉速差异在几十倍。由此也可间接看出, 水中离子成分差异对细颗粒沉降速度起到了显著影响, 至于是何种离子对沉速起主要作用, 后续研究还有

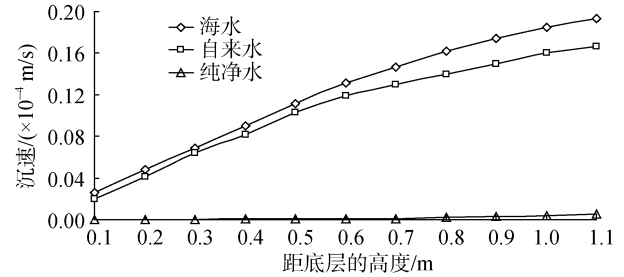


图 5 不同水样沉速计算结果比较图

Fig. 5 Comparisons of settling velocity in different water samples

待进一步检测分析。

自来水与天然水的沉速虽较为接近, 但仍有 10%~20% 的差异, 因此为了试验的准确性, 本次试验所用水样全部取自现场。

2 试验结果分析

2.1 含沙量对沉速的影响

将本次试验洪枯季所有 150 余组代表沉速与含沙量的关系点汇于图 6。对于不同季节、同一竖线上的点来说, 沉速的差异主要由盐度造成。在以往的研究中多见于直接把细颗粒泥沙沉速与絮凝粒径建立相关关系, 但由于(1)到目前为止, 对于絮凝体尺寸的直接测量困难较大^[12-13], (2)在沉降过程中, 絮凝体一直处于发育-破坏的动态平衡过程, 絮凝体的大小和沉速的相关关系较为复杂。因此在本文中, 絮凝阶段和现象的判据不是絮凝粒径, 而是通过沉速这个指标来判断的。通过以往研究可知^[8-13], 沉速的变化是与絮凝体发育过程直接相关的, 如果含沙量对沉降过程产生了影响, 实际上这是由于含沙量对絮凝发育过程(包括对絮凝粒径、絮凝体密度、颗粒间电荷等)产生影响的直接结果。

由图 6 来看: (1)不论洪枯季, 沉速与含沙量的关系都是先增加后减小, 且拐点位置基本相同: 即在 0~3 kg/m³ 时, 沉速随含沙量迅速增加, 这个过程属于絮凝加速沉降阶段(I 区); 当含沙量在 3~8 kg/m³ 左右时, 沉速达到最大絮凝沉速(II 区), 并随着含沙量在一定范围内时能基本保持平稳, 最佳絮凝含沙量为 4~6 kg/m³, 极限沉速为 0.25~0.4 mm/s; 当含沙量超过 8 kg/m³ 时, 属于阻滞沉降阶段(III 区), 沉速在原有基础上迅速下降, 基本达到一个下限值, 且对含沙量的敏感程度大幅降低。(2)在絮凝加速沉降阶段, 沉速随着含沙量的变化过程很快, 含沙量为

0.5 kg/m³ 和 2.5 kg/m³ 时, 其它条件一样, 沉速可相差 10 倍以上。(3) 洪枯季沉速主要在最大絮凝沉速阶段有明显差异, 到阻滞沉降阶段, 温度对沉速的影响较小。(4) 在图 6 中, 竖向上三角点较为密集, 圆点较为分散, 尤其是 II 区, 这也间接说明洪季时盐度对沉速的影响较枯季时要小。

2.2 盐度对沉速的影响

本次试验所得的洪枯季水温条件下, 盐度对沉速的影响见图 7, 图中不同颜色的线条表示含沙量的不同。由图 7 可见: (1) 枯季水温时, 不同的含沙量水

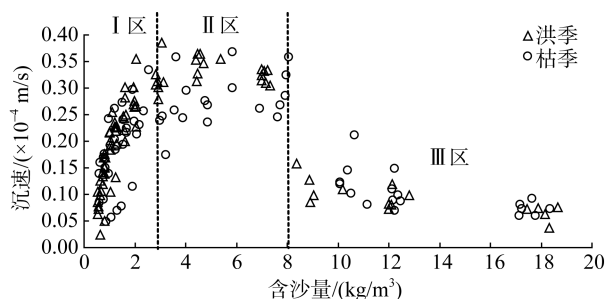


图 6 不同含沙量对沉速的影响

Fig. 6 The relationship between experimentally measured settling velocity and SSC

平时, 尽管沉速有所不同, 沉速最大时对应的盐度基本都在 7; 含沙量相同、盐度不同时, 盐度对沉速的影响在 1.8~5.7 倍左右; 当含沙量较高时, 盐度对沉速的影响较小。(2) 洪季水温时, 不同的含沙量水平时, 最佳絮凝盐度在 10~12; 洪季水温时盐度对沉速的影响程度较枯季时小得多; 含沙量相同、盐度不同时, 盐度对沉速的影响在 1.5~2.2 倍左右; 同样, 当含沙量较高时, 盐度对沉速的影响较小。

2.3 温度对沉速的影响

为单独分析温度对沉速的影响, 选取了盐度为 7, 含沙量为 1 和 4.5 kg/m³ 情况下, 温度从 14℃ 逐渐变化到 30℃ 时(变化间距为 2℃), 温度对沉速的影响关系见图 8。总体来看, 温度上升, 沉速是增加的; 含沙量为 1 kg/m³ (絮凝加速阶段) 时, 温度对沉速的影响不太明显, 温度从 14℃ 变化到 30℃ 时, 沉速从 0.21 mm/s 升高至 0.24 mm/s; 而含沙量为 4.5 kg/m³ (最大絮凝阶段) 时, 温度对沉速的影响比较明显, 温度从 14℃ 变化到 30℃ 时, 沉速从 0.25 mm/s 升高至 0.42 mm/s, 约为 1.7 倍。在阻滞沉降阶段, 由图 6 可见, 当含沙量超过 8 kg/m³ 后, 温度对沉速基本无影响。

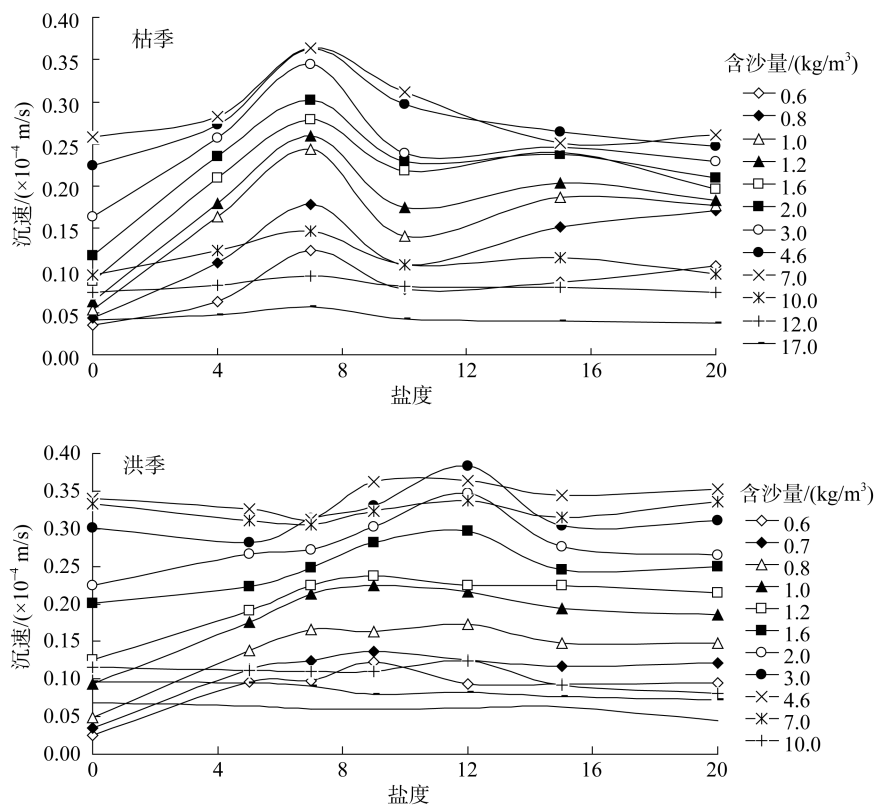


图 7 不同季节(水温不同)条件下不同盐度对沉速的影响

Fig. 7 The relationship between experimentally measured settling velocity and salinity in dry and wet seasons

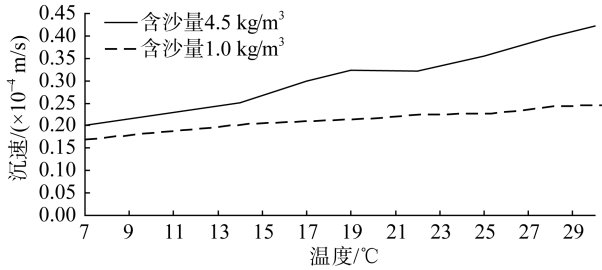


图 8 不同含沙量条件下温度对沉速的影响

Fig. 8 The relationship between settling velocity and temperature

此外, 根据本次洪枯季(枯季代表温度为 7°C、洪季为 27°C)相同盐度情况下的沉速对比(见图 6)亦可看出: 洪枯季, 沉速的主要差别在最佳絮凝含沙量阶段(3~8 kg/m³)。

表 2 沉速成果对比表

Tab. 2 Comparisons of settling velocity among different empirical formulas

公式名称	公式	主要控制参数	本文选取值	取值(mm/s)
武水公式	$\omega = \sqrt{1.09 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D + (13.95 \frac{v}{D})^2} - 13.95 \frac{v}{D}$	粒径、温度黏性、容重	粒径 8 μm, 温度 25°C 时黏性系数	0.04
沙玉清公式	$\omega = \frac{1}{24} \frac{r_s - r}{r} \frac{g D^2}{v}$		为 0.00089 Ns/m², 容重 2 650 kg/m³	0.05
Stokes 公式	$\omega = \frac{1}{18} \frac{r_s - r}{r} \frac{g D^2}{v}$			0.06

注: ω 为沉速, γ_s 为泥沙容重, γ 为水的容重, g 为重力加速度, D 为泥沙粒径, v 为黏性系数。

最佳絮凝盐度的认识与金鹰^[16]、蒋国俊^[18]、张忠忠^[19]、关许为^[20]等研究人员的认识基本一致, 在 5~15 左右。

3 长江口悬沙静水沉速公式的建立

很多科学和工程问题都是通过诸如采样、实验等方法获得若干离散的数据, 然而研究者往往希望得到一个连续或分段的函数(也就是曲线)来定量分析总结相关规律, 同时也为了便于研究成果的推广应用。因此采用拟合或者回归来研究两个或两个以上因素之间的统计相关关系, 是挖掘试验数据背后规律的重要手段。

为了充分考虑到不同因子的贡献, 采用了多元回归的方法来拟合经验公式。多元回归的拟合方法一般很少被采用, 其主要原因是难以构造合适的多元拟合函数, 且其置信区间易受试验样本的限制; 但是它的优点是它能较为合理地反映不同因子的贡献, 尤其适合数学模型来使用。由于本次静水沉降试验分别针对洪枯季两种水温条件, 就含沙量、盐度对

2.4 本试验成果与其它成果的对比

本次试验所得沉速在 0.05~0.4 mm/s 范围内变化, 本研究所得到的北槽悬沙沉速值与 Mehta^[14]、韩乃斌^[15]、金鹰^[16]等研究者结果较为相近。与国外部分河口的沉速值也较为接近^[17]。

利用武水公式、沙玉清公式或者 Stokes 公式计算的相应粒径下的沉速值在 0.04~0.06 mm/s 左右(表 2), 远低于本次试验值。同时根据本次试验所得的纯水的沉速值远小于天然海水下的沉速值可知, 细颗粒泥沙沉速对背景离子浓度、含沙量等因素非常敏感。因此单纯建立沉速和粒径的经验关系已完全不适用于细颗粒泥沙的沉速计算, 必须要考虑盐度、含沙量对沉速的影响。

沉速的影响进行系列试验。因此本试验样本非常适用于二元拟合。

从图6~图7来看, 为同时考虑不同阶段盐度及含沙量对沉速的影响, 借鉴以往类似的公式形式, 采用分段(絮凝加速段和阻滞沉降段)拟合的形式来建立洪枯季分段的长江口北槽悬沙沉速经验公式。

统一形式:

$$\omega = (k_1(S - S_0)^2 + k_2)C^{k_3}, \quad (0 \leq S < 30, 0 \leq C < 20) \quad (4)$$

式中 ω 为沉速, 单位: mm/s; S 为盐度; C 为含沙量, 单位: kg/m³; S_0 为最佳絮凝盐度; k_1, k_2, k_3 为经验系数。

通过交互式分段回归并采用最小二乘法估算其误差后, 拟合的相关经验参数如表 3。经验公式所得的计算值与试验值的对比见图 9, 总体拟合结果较好。

4 结论

1) 含沙量对长江口细颗粒沉降速度影响最大。沉速与含沙量的关系分 3 个典型阶段: 在 0~3 kg/m³ 时, 沉速随含沙量迅速增加, 这个过程属于絮凝加

表 3 沉速公式参数对照表

Tab. 3 Parameterizations of the settling velocity in different stages and seasons

阶段	分区间	枯季 $S_0 = 7$	洪季 $S_0 = 12$
絮凝加速阶段	最佳絮凝盐度区间	$k_1 = -0.0067, k_2 = 0.22, k_3 = 0.49$ ($4 \leq S \leq 10, 0.5 < C \leq 3$)	$k_1 = -0.0025, k_2 = 0.20, k_3 = 0.68$ ($9 \leq S \leq 15, 0.5 < C \leq 3$)
	其它盐度区间	$k_1 = 0.0005, k_2 = 0.10, k_3 = 0.41$ ($0 \leq S < 4$ & $10 < S < 30, 0.5 < C \leq 3$)	$k_1 = -0.0004, k_2 = 0.18, k_3 = 0.66$ ($0 \leq S < 9$ & $15 < S < 30, 0.5 < C \leq 3$)
最大絮凝阶段	所有区间	$k_1 = -0.0004, k_2 = 0.23, k_3 = 0.16$ ($3 < C \leq 8$)	$k_1 = -0.0001, k_2 = 0.41, k_3 = 0.12$ ($3 < C \leq 8$)
絮凝制约阶段	所有区间	$k_1 = 0, k_2 = 0.99, k_3 = -1.02$ ($8 < C \leq 20$)	

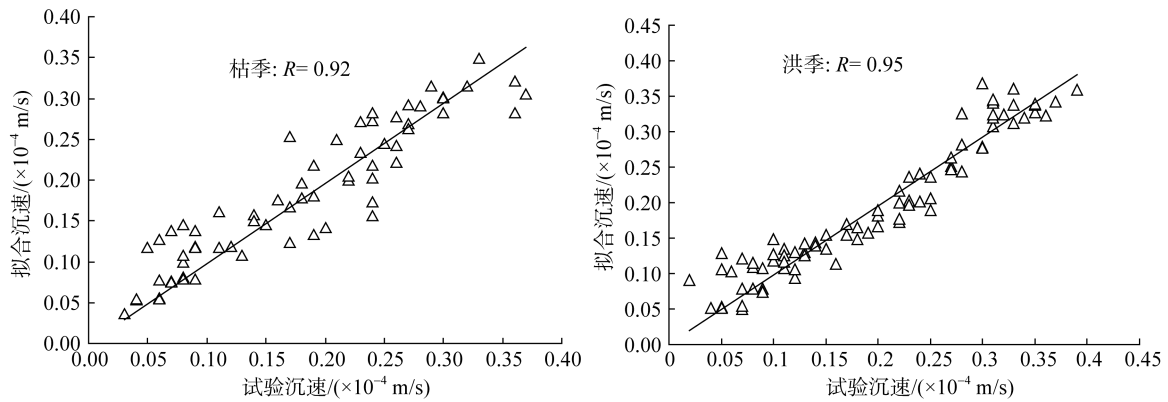


图 9 回归拟合后的计算值与试验值的对比

Fig. 9 Comparisons between measurement data and fitted results

速沉降阶段; 当含沙量在 3~8 kg/m³ 时, 沉速达到最大絮凝沉速并在一定范围内时能基本保持平稳, 属于沉速平稳阶段; 当含沙量超过 8 kg/m³ 时, 沉速在原有基础上迅速下降, 基本达到一个下限值, 属于阻滞沉降阶段。在絮凝加速沉降阶段, 沉速随着含沙量的变化过程很快, 含沙量为 0.5 kg/m³ 和 2.5 kg/m³ 时, 其它条件一样, 沉速可相差 7 倍左右。

2) 含沙量越高, 盐度对沉速的影响越小。含沙量相同情况下, 长江口北槽悬沙枯季水温下盐度对沉速的影响在 1.8~5.7 倍左右; 洪季水温下盐度对沉速的影响在 1.5~2.2 倍左右。枯季最佳絮凝盐度在 7 左右, 最佳絮凝含沙量为 7 kg/m³; 洪季最佳絮凝盐度在 10~12 左右, 最佳絮凝含沙量为 4.5 kg/m³。

3) 总体上, 温度上升, 沉速是增加的, 但不同阶段影响程度有所不同; 含沙量为 1 kg/m³ (絮凝加速阶段) 时, 温度对沉速的影响不太明显, 温度从 14℃ 变化到 30℃ 时, 沉速从 0.21 mm/s 升高至 0.24 mm/s; 而含沙量为 4.5 kg/m³ (最大絮凝阶段) 时, 温度对沉速的影响比较明显, 温度从 14℃ 变化到 30℃ 时, 沉速从 0.25 mm/s 升高至 0.42 mm/s, 约为 1.7 倍。在阻滞沉降阶段, 当含沙量超过 8 kg/m³ 后, 温度对沉速基本无影响。

4) 根据本次试验数据和成果建立了形如 $\omega = (k_1(S - S_0)^2 + k_2)C^{k_3}$ 的长江口北槽悬沙沉速经验公式, 可供相关研究参考。

5) 考虑含沙量、温度、盐度对悬沙沉速的影响 (与之前数物模常取固定值比), 不仅能直接改变整个长江口宏观悬沙场的分布 (尤其是拦门沙附近) 和输运特性, 而且能直接改变不同区域的垂线含沙分布。根据本研究所得的含沙量、盐度、温度对沉速影响的试验成果, 可分析沉速对不同季节、区段长江口北槽悬沙的垂线分布形态、航道淤强分布等的影响, 同时也可直接指导数学、物理模型研究工作, 为回淤原因分析提供相关技术支撑。

参考文献:

[1] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
[2] van Rijn L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas [M]. Amsterdam: Aqua Publications, 1993.
[3] US Army Corps of Engineers. Sedimentation Investigation of Rivers and Reservoirs. Engineering Manual 1110-2-4000 [M].

- Washington: US Army Corps of Engineers, 1995.
- [4] 沈洪, 顾峰峰, 万远扬, 等. 长江口洪季北槽深水航道区域悬沙沉降速度估算[J]. 海洋工程, 2013, 31(02): 88-93.
- [5] Winterwerp J C, Manning A J, Martens C, et al. A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68(1-2): 195-207.
- [6] 黄建维. 海岸与河口黏性泥沙运动规律的研究和应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [7] 杨扬, 庞重光, 金鹰, 等. 长江口北槽黏性细颗粒泥沙特性的试验研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(1): 18-24.
- [8] Manning A J, Langston W J, Jonas P J. A review of sediment dynamics in the Severn Estuary: influence of flocculation [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 61: 37-51.
- [9] van Leussen W. Macroflocs, fine-grained sediment transports, and their longitudinal variations in the Ems Estuary [J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(2-3): 387-401.
- [10] 万远扬, 吴华林, 沈洪, 等. 潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评 I——基本概念与研究方法[J]. 水运工程, 2014, 489(3): 18-23.
- [11] McLaughlin R T. Settling Properties of Suspensions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1961, 126(1): 1780-1786.
- [12] Agrawal Y C, Pottsmith H C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport [J]. Marine Geology, 2000, 168(1-4): 89-114.
- [13] Smith S J, Friedrichs C T. Size and settling velocities of cohesive flocs and suspended sediment aggregates in a trailing suction hopper dredge plume [J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(10, Supplement): S50-S63.
- [14] Mehta A J. On estuarine cohesive sediment suspension behavior [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 14303-14314.
- [15] Han N B, Lu Z Y. Settling properties of the sediments of the Changjiang Estuary in salt water [C]//Ren Mei'e. Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf. Beijing: China Ocean Press, 1983: 483-493.
- [16] 金鹰, 王义刚, 李宇. 长江口粘性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 61-63.
- [17] Fathi-Manoochehr M, Arman A, Emamgholizadeh S, et al. Settling properties of cohesive sediments in lakes and reservoirs [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011, 137(4): 204-209.
- [18] 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 51-57.
- [19] 张志忠. 长江口细颗粒泥沙基本特性[J]. 泥沙研究, 1996, 1: 67-73.
- [20] 关许为, 陈英祖, 杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究[J]. 水利学报, 1996, 6: 70-74, 80.

Experimental study on the settling velocity of suspended sediment in the Yangtze River Estuary

WAN Yuan-yang^{1, 2}, WU Hua-lin¹, SHEN Qi¹, GU Feng-feng¹

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Scientific Research Center, Shanghai 201201, China; 2. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft 2601DA, The Netherlands)

Received: Jul., 21, 2013

Key words: the Yangtze River Estuary; fine sediment; settling velocity; settling column

Abstract: For the coastal sedimentology, especially for those fine sediment estuaries, settling velocity is a critical parameter that is of significant importance for us to understand their behavior and dynamics. Based on the well known drawbacks and short comings of the traditional settling column, a new apparatus has been developed for measuring the settling velocity of fine suspended sediment in laboratory. In this study, we found that not only suspended sediment concentration but also salinity and temperature could significantly influence the settling velocity, and finally an empirical formula was proposed based on a series of experiments. This study may help improve our understanding on this topic and favor numerical modelling on fine sediment.

(本文编辑: 刘珊珊)