



# 潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评Ⅲ ——沉速的影响因子\*

万远扬<sup>1,2</sup>, 吴华林<sup>1</sup>, 沈 淇<sup>1</sup>, 顾峰峰<sup>1</sup>

(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:** 作为“潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评”的第3部分, 在前人大量理论和试验研究的基础上, 对决定细颗粒泥沙沉降速度最重要的3个因子(含沙量、盐度和温度)影响沉速的方式进行了综述。通过对比与分析认为: 1) 含沙量是影响沉速的主要因子之一, 当含沙量在一定范围内, 含沙量增加沉速增加; 当超越一定限度, 含沙量增加, 沉速反而减小, 存在一个最佳絮凝含沙量区间。2) 温度与沉速的关系还需进一步探索; 盐度与沉速的关系也存在一定争议, 可能存在最佳絮凝的盐度条件。3) 含沙量、盐度和温度均能显示其对细颗粒泥沙沉降速度程度不同的影响力, 且各因子对沉速的影响关系并非单一、较为复杂, 不同地域、时段和区段某些关键参数的差异较大。

**关键词:** 潮汐环境; 细颗粒泥沙; 沉降速度; 影响因子

中图分类号: TV 856

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0021-05

## Reviews on settling velocity of fine sediment in tidal environment 3: Controlling factors

WAN Yuan-yang<sup>1,2</sup>, WU Hua-lin<sup>1</sup>, SHEN Qi<sup>1</sup>, GU Feng-feng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;

2. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft 2601 DA, The Netherlands)

**Abstract:** This paper is the third part of a series review on the settling velocity of fine sediment in tidal environment. On the basis of the afore-mentioned contexts and related literatures, the influential factor of determining the settling velocity is analyzed. The findings of this review are as follows: 1) Suspended sediment concentration (SSC) is taken as one of the major determinants for the settling process of fine sediment. When SSC is in a small range, the settling velocity is increasing with SSC, but it will fall down with SSC when the magnitude of SSC is over a greater value; 2) The dependency of temperature on the settling velocity needs more attention in the future, and the salinity has significant contribution to the settling velocity; 3) SSC, temperature and salinity all manifest their influences on the settling velocity to different extents. The dependency between SV of estuarine fine sediments and its various determinants (SSC, salinity, temperature, etc.) rely highly on some given conditions.

**Key words:** tidal environment; fine sediment; settling velocity; influential factor

作为“潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评”的第3部分, 本文是在前人大量研究的基础上, 筛选出了普遍认为的、决定细颗粒泥沙沉降速度最重要的3个因子: 含沙量、盐度和温度。并讨论了这3个决定因子对沉降速度的贡献。

由于不同研究者所研究的区域不一样, 水样沙样选择不一样, 控制条件不一样, 测量手段、计算方法也不一样, 得到的不同因子对沉速影响定性定量结果也差异很大。这里将主要分析含沙量、水温、盐度3个讨论最多的因子对沉速的影响。

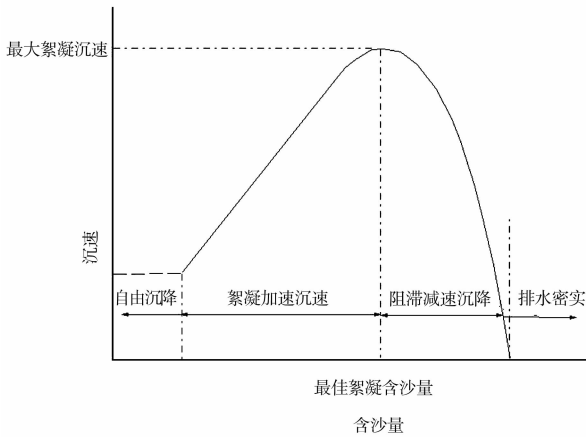
收稿日期: 2013-08-19

\*基金项目: 交通运输部科技项目(2012329A06040); 国家自然科学基金(41206072)

作者简介: 万远扬(1981—), 男, 博士研究生, 副研究员, 从事河口泥沙动力学研究。

### 1 含沙量对沉速的影响

细颗粒泥沙沉降特性与粗颗粒明显不同的是，当背景泥沙浓度变化时，颗粒的碰撞、絮凝等会显著改变沉降速度。根据前人研究，细颗粒泥沙沉降一般分为自由沉降、絮凝加速沉降、阻滞（制约）减速沉降、密实排水沉降4个阶段<sup>[1]</sup>，其不同阶段沉速与含沙量复杂的相关关系见图1。



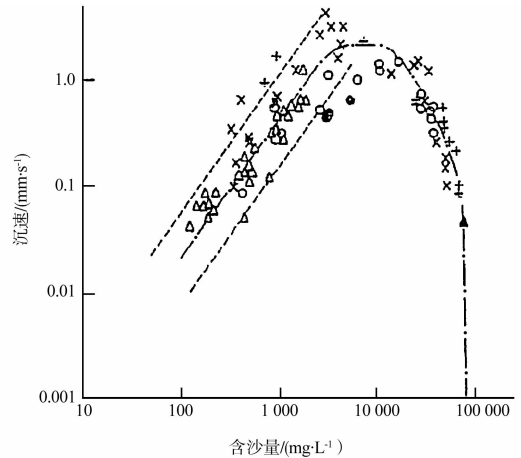
注：最大絮凝沉速即为极限沉速，最佳絮凝含沙量为临界含沙量。

图1 细颗粒泥沙沉速与含沙量概化相关关系<sup>[1]</sup>

在背景浓度很低时，泥沙沉降以单颗粒沉降为主，沉速主要受粒径影响，在一定泥沙浓度范围内，沉速基本不变（自由沉降阶段）；当背景含沙量继续增加时，单颗粒泥沙开始絮凝，或者小絮团逐渐组合成大絮团，此时沉速明显较第1阶段加速，且大大超越前者，在第2阶段末期，沉速将随含沙量增大到某一极限值；第3阶段为阻滞沉降（制约沉降）阶段，由于含沙量的继续增加、超越一定程度后，会导致其对水流紊动产生的制约效果超越絮凝加速作用，此时部分絮团甚至会解散，沉速与含沙量呈负相关关系；最后一个阶段属于密实阶段，随着含沙量（或者此时称表层弱固结层密度）的增加和沉速的减小，泥沙已经基本处于河床表面，此时属于排水密实阶段，沉速非常小，基本可以忽略。

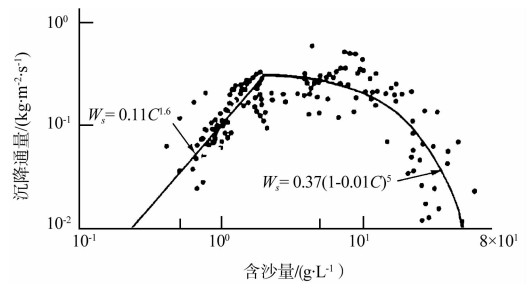
图2~5为国外一些细颗粒泥沙河口含沙量与沉速的较全面的相关关系。总体上，从图中可见，沉速和含沙量关系基本都是由一个正相关阶段和负相关阶段组成，其定性认识基本与图1类似；

由于各河口在泥沙粒径、温盐条件、粒径及化学组成等方面特性各异，且沉速测量手段、方法也不尽一致，所以其相关关系中最核心两点——临界含沙量（最佳絮凝含沙量）和极限沉速（最大絮凝沉速），差异很大，见图2~5。



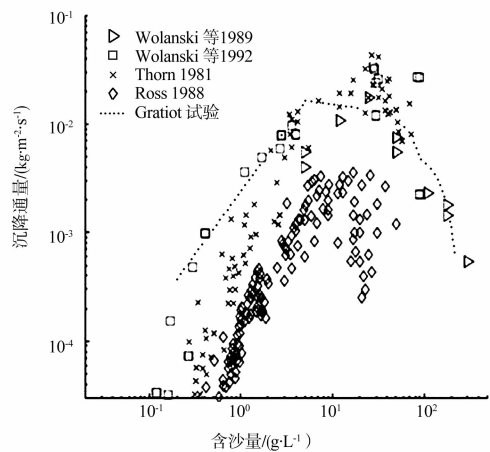
注：不同形状的散点为不同的试验数据，其中临界含沙量为5~10 kg/m<sup>3</sup>，极限沉速为1~3 mm/s。

图2 国外细颗粒泥沙含沙量与沉速的关系1<sup>[2]</sup>



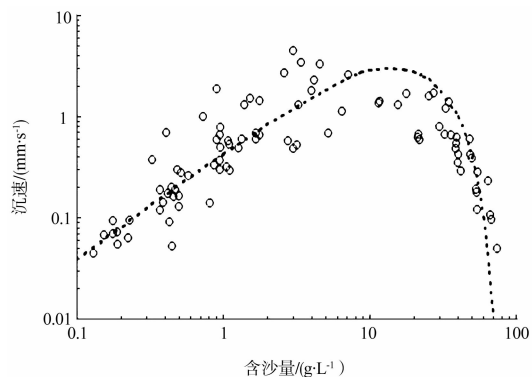
注：其中临界含沙量为2~3 kg/m<sup>3</sup>，极限沉速为0.3 mm/s。

图3 国外细颗粒泥沙含沙量与沉降通量（为沉速与含沙量的乘积）的关系1<sup>[3]</sup>



注：其中临界含沙量为5~30 kg/m<sup>3</sup>，极限沉速为0.5~2 mm/s。

图4 国外细颗粒泥沙含沙量与沉降通量（为沉速与含沙量的乘积）的关系2<sup>[4]</sup>



注: 其中临界含沙量为 $20 \text{ kg/m}^3$ , 极限沉速为 $2\sim 4 \text{ mm/s}$ 。

图5 国外细颗粒泥沙含沙量与沉速的关系<sup>[5]</sup>

## 2 温度对沉速的影响

水温对沉速的影响最初体现在 Stokes 公式里的运动黏性系数中, 实际上运动黏性系数是受温度影响较为敏感的一个参数; 尽管如此, 水温对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响长期以来不被大多数学者和工程界所重视, 但还是有少量研究(图6)表明, 当水温升高后, 细颗粒的絮凝作用明显增强, 甚至具备图6中 $25^\circ\text{C}$ 的阈值型影响特性<sup>[6]</sup>。不过, 国内外也有不少学者发现动水絮凝沉速随着温度的升高而降低<sup>[7]</sup>。

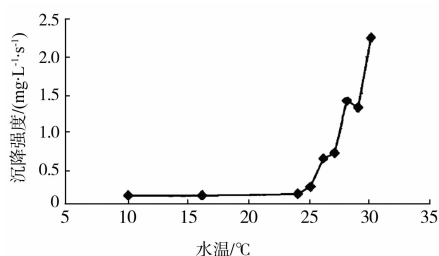


图6 水温与沉降强度的相关关系<sup>[6]</sup>

理论上, 温度对细颗粒泥沙沉速的影响, 有两个方面的表现: 一方面水温升高会导致水的运动黏性系数会降低, 紊动的阻力也会降低, 颗粒碰撞机会增加, 因此沉降过程会加速, 沉速一般会增加。黄建维<sup>[8]</sup>(图7)及白玉川<sup>[9]</sup>(图8)分别以连云港和天津港原状泥沙为样品研究了水温和含沙量、沉速的关系, 由图可见, 温度与沉速属正相关关系, 且温度对不同含沙量的沉速影响基本均匀。

另一方面, 从理论上来看, 当温度超过一定的值后(这个具体值可能与当地水体环境相关), 温度会使得水体的脉动强度、离子活性等微观絮凝动力因子增强, 并可能会超过最佳絮凝的相关阈值条件, 此时温度就会对絮凝沉降起到一定抑制作用。因此, 是否存在一个最佳絮凝温度范围(或者在其它条件限定的情况下)是值得深入研究的问题。

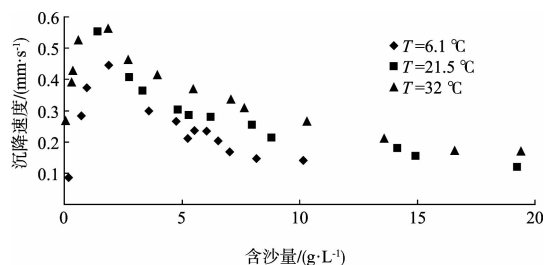


图7 连云港泥沙温度与含沙量、沉速的关系<sup>[8]</sup>

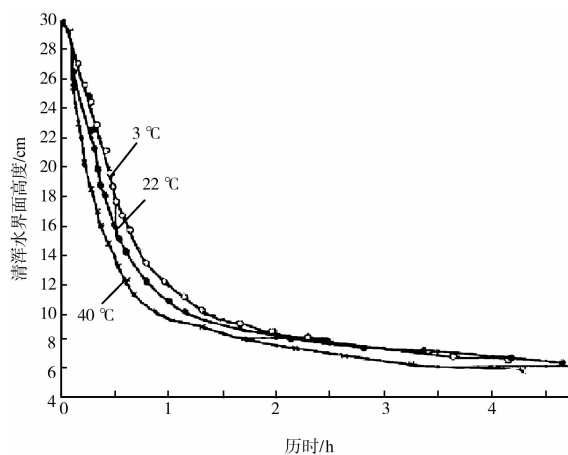


图8 天津港泥沙温度与沉速的关系<sup>[9]</sup>

## 3 盐度对沉速的影响

由于海水中含有对泥沙絮凝有利的高价阳离子, 因此盐度是影响细颗粒泥沙絮凝沉降的一个重要因子。已有研究表明: 并非盐度越大, 对絮凝越有利、沉速越大, 而是存在一个所谓的最佳絮凝盐度。不同的研究者对该值的定义有所不同<sup>[10-11]</sup>, 比如金鹰<sup>[12]</sup>认为长江口盐度为 $10\sim 16 \text{ ppm}$ 时, 长江口黏性泥沙絮团最大, 最佳絮凝盐度约为 $12 \text{ ppm}$ ; 蒋国俊等<sup>[6]</sup>认为长江口最佳絮凝盐度为 $4\sim 16 \text{ ppm}$ ; 关许为<sup>[13]</sup>认为 $5 \text{ ppm}$ 以上, 盐度对

絮凝的影响将减弱；陈邦林<sup>[14]</sup>认为 10 ~ 13 ppm 为长江口最佳絮凝盐度。值得指出的是，由于受条件所限，不同学者采用的海水来源不一致，有的来自天然，有的属于人工配制，这样会导致其有机质含量有差异，对沉速的影响也不尽一致。

图 9 是黄建维<sup>[8]</sup>以连云港原状沙为样品得到的含盐度、含沙量与沉速的关系曲线，由图 9 可见，不同的含沙量水平时，最佳絮凝盐度差异较大。白玉川<sup>[9]</sup>的试验（图 10）亦能表明盐度显著影响泥沙沉速。Burt<sup>[15]</sup>总结了前人的室内试验结果，发现了在不同含沙量水平下，盐度对沉速的贡献也是不同的（图 11）。

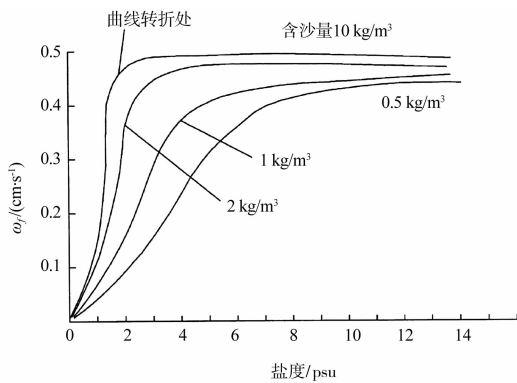


图 9 连云港泥沙盐度、含沙量与沉速的关系<sup>[8]</sup>

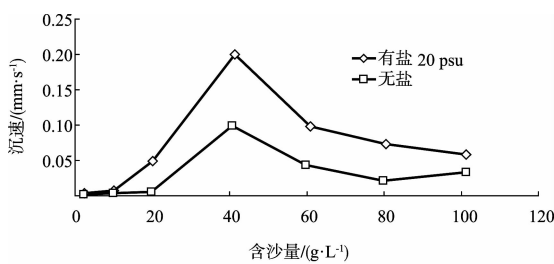


图 10 天津港泥沙盐度、含沙量与沉速的关系<sup>[9]</sup>

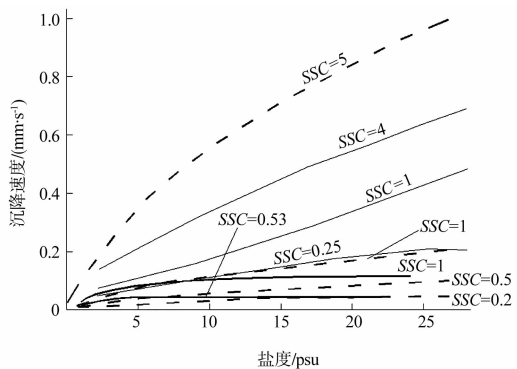


图 11 不同含沙量水平下，盐度对沉速的影响关系<sup>[15]</sup>

#### 4 其它因子

其它影响细颗粒泥沙沉降速度的因子有：絮团粒径和密度、水质（包括微生物环境）、水体中阳离子浓度、泥沙的组分等。在细颗粒泥沙沉降过程中，絮团一直处于不断地发育 - 破坏的发展阶段，其大小和密度，本质上是一直处于变化之中的；此外，由于目前技术手段的限制，絮团大小，尤其当浊度超过一定限度后，是非常难以分辨的，因此笔者不建议把这二者与沉速直接建立关系；而水质、离子浓度、泥沙组分等均可在试验时选择原状水样和原状沙样来分析，这样就能在特定的条件下，研究特定区域的泥沙沉速问题。

#### 5 结论

1) 含沙量是影响沉速的主要因子之一，当含沙量在一定范围内，含沙量增加沉速增加；当超越一定限度，含沙量增加，沉速反而减小，存在一个最佳絮凝含沙量区间。

2) 温度的增加与沉速的关系还需进一步探索；存在一个最佳絮凝盐度值，使得沉速最大。

3) 含沙量、盐度和温度均能显示其对细颗粒泥沙沉降速度程度不一的影响力，且各因子对沉速的影响关系并非单一、较为复杂，不同区域某些关键值差异较大。

4) 由于室内试验技术的限制，前期研究大多都仅针对单因子（如盐度、粒径等）进行试验，很少有系统地针对潮汐环境下细颗粒泥沙沉速与水温、盐度、含沙量、粒径等核心参数的关系进行相关研究或建立统一的经验公式。

5) 泥沙学科属于试验性、经验性较强的学科，有一些关键参数具有很强的特定性，很多影响因素、计算公式不可任意外推延展，此外考虑含沙量、温度、盐度对悬沙沉速的影响（与之前数物模常取一固定值比较），不仅能直接改变整体宏观悬沙场的分布和输运特性，而且能直接改变不同区域的垂线含沙分布，因此对于潮汐河口细颗粒泥沙沉速问题需要慎重对待。

