



潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评II ——计算方法与公式*

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: 作为“潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评”的第二部分, 详细介绍了在潮汐环境下确定细颗粒泥沙沉降速度的计算公式与相关方法。通过正式文献可以考证的, 关于细颗粒泥沙沉降速度的计算公式逾百种, 每个公式均有其一定理论或经验的背景, 本文系统地分析并对比了不同背景的计算公式和方法: 1) 以粒径为主要因子的半经验公式(武水公式、Stocks公式等), 忽略了细颗粒泥沙的基本沉降特性; 2) 以含沙量为主要变量的泥沙沉降经验公式, 不同研究者得到的结果或者公式的参数差异较大, 在没有确认其计算条件、计算方法、测量工具、适用条件前, 需谨慎选择, 不能简单吸纳, 尤其是在盐淡水混合的潮汐环境下, 其相关关系和影响因子具有较强的特定性; 3) 劳斯公式拟合法所得的“有效沉速”, 在计算过程把不同因子导致的泥沙颗粒向下的运动均归为泥沙重力沉降过程, 物理概念不清晰; 4) 麦克劳林公式计算细颗粒泥沙沉速, 符合沉速的物理定义, 其理论性和物理意义也较强。

关键词: 潮汐环境; 细颗粒泥沙; 沉降速度; 经验公式; 长江口

中图分类号: TV 856

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0016-05

Review on settling velocity of fine sediment in tidal environment 2: Formulation

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

(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 second part of a series reviews on the settling velocity of fine sediment in a tidal environment. Based on many domestic and foreign literatures, we discuss and compare the methods for determining the settling velocity and its formulation. In past relevant studies, a number of empirical or semi-empirical formulas are proposed, each of which has its own applicable condition and limitation. Here the background of these methods and formulas are presented to remind us of making a reasonable choice during practical application. The conclusions are as follows: 1) The D_{50} -oriented formula can not take account in the basic feature of settling for fine sediment, so it is not recommended; 2) The SSC-oriented formula is site- and case-specified, the coefficients vary dramatically with different studies, one should be careful on the applicability; 3) The Rouse formula can not distinguish the settling component of gravitational settling from the overall downward movement; 4) Due to the strict physical meaning, the McLaughlin formula is recommended for formulating the settling velocity of fine sediment.

Key words: tidal environment; fine sediment; settling velocity; empirical formula; the Yangtze estuary

本文作为“潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评”的第2部分, 主要汇总介绍已有的、在潮汐环境下确定细颗粒泥沙沉降速度的计算公式及计算方法。

1 计算公式与方法

对于细颗粒泥沙而言, 一般难以通过记录其运动轨迹来直接计算沉速, 因此只能通过间接方法推求。到目前为止, 在工程实际和相关应用中,

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, 副研究员, 博士, 研究领域为河口泥沙动力学。

细颗粒泥沙沉降速度的计算公式或方法大致可分为以下几类。

1.1 以粒径为主要因子的半经验公式

在国内外,以泥沙单颗粒粒径或者絮团大小为主要影响因子,比较常用的计算泥沙沉速的公式^[1]有武水公式、Stokes公式、沙玉清公式等。

$$\text{Stokes 公式: } \omega = \frac{1}{18} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{gD^2}{\nu} \quad (1)$$

$$\text{沙玉清公式: } \omega = \frac{1}{24} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{gD^2}{\nu} \quad (2)$$

武水公式:

$$\omega = \sqrt{1.09 \times \frac{\rho_s - \rho}{\rho} gD + \left(13.95 \frac{\nu}{D}\right)^2} - 13.95 \frac{\nu}{D} \quad (3)$$

式中: ω 为泥沙沉速; ρ_s , ρ 为泥沙和水的密度; g 为重力加速度; D 为泥沙粒径; ν 为运动黏性系数。

很明显,这类公式直接沿用或者推广粗颗粒泥沙沉速公式,大大忽略了细颗粒泥沙沉降的特定属性;即使考虑絮团粒径,也缺乏相关理论和实践基础,且忽略了很多其它重要因子的直接贡献。

1.2 以含沙量为主要因子的经验公式

在认识到以粒径为细颗粒沉速影响因子的不足后,国内外众多研究者^[2-12]根据特定颗粒条件及试验环境,以含沙量为主要影响因子,还适度考虑盐度、温度等因子,率定出了一些经验公式,本文总结其统一形式如下:

$$\omega = \omega_{50} \omega_c K_s K_A \quad (4)$$

式中: ω_{50} 为单颗粒泥沙沉速; ω_c 为考虑含沙量影响的沉速; K_s 为盐度的影响因子; K_A 为其他因子的影响,如温度、紊动强度、絮团大小、粒径等。

1) 考虑含沙量的影响。

$$\begin{cases} \omega_c = k_1 C^\alpha (\text{絮团加速阶段}) & 0 < C \leq C_p \\ \omega_c = (1 - k_2 C)^\beta (\text{阻滞沉降阶段}) & C > C_p \end{cases} \quad (5)$$

式中: Krone^[7]通过试验确定 $k_1 = 0.001$, $\alpha = 4/3$; Mehta^[8]的取值为: $k_1 = 0.11$, $k_2 = 0.01$, $\alpha = 1.5$,

$\beta = 5$; C_p 为最佳絮凝(拐点)含沙量,黄建维^[13](连云港泥沙)认为取 1.5 kg/m^3 ,张世奇^[14](黄河口泥沙)认为取 15 kg/m^3 ,Mehta^[8](Florida 泥沙)认为取 3 kg/m^3 ,Manning^[15](Severn 河口泥沙)认为取 20 kg/m^3 。

2) 考虑盐度的影响。

黄建维^[16]通过室内试验建立如下经验关系:

$$\begin{cases} k_s = (S - S_a)^n (\text{最佳絮凝区附近}) \\ S_a - m \leq S \leq S_a + m \\ k_s = 1 (\text{其他阶段}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_a 为最佳絮凝盐度。

3) 考虑紊动的影响。

VanLeussen^[3]于1994年在考虑含沙量影响的基础上,认为水流的紊动对泥沙沉速也有一定影响,提出了如下经验参数:

$$K_A = \frac{1 + aG}{1 + bG^2} \quad (7)$$

式中: a , b 为经验参数; $G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}}$ 为紊动参数, ε 为湍流耗散率。

以上公式,已经在朝着细颗粒泥沙沉降特有属性方向靠拢了,尤其是含沙量的影响,近半个世纪以来,已经被公认为细颗粒泥沙沉降的主要影响因子。从不同公式系数的巨大差异可见,细颗粒泥沙沉降特性的复杂性和研究成果的特定性。此外,前人研究在沉降速度敏感因子的选择上不够广且很多并非单因子分析。此外需要指出的是,国内有些学者提出动水沉速的概念,而且认为泥沙在动水中的沉速会小于在静水中的沉速,这种观点不一定正确,且从概念上已经超越了沉速的标准定义,是一种欠妥的表述方式,与其说是水流速度对沉速过程产生影响,不如理解为水流的脉动或者紊流对沉速的影响。紊流既可能增加泥沙的垂直运动速度,也可能是减小,应取决于瞬时泥沙颗粒所处的环境。

1.3 劳斯(Rouse)公式拟合法

泥沙沉降速率是决定悬沙浓度垂线分布规律

的一个重要因素。然而，在一般条件下，悬沙受到水体结构、水体中电解质成分及周围悬沙浓度等多种作用的影响，因沉降运动规律复杂沉降速率通常不易求得，可近似用 Rouse 公式表示悬沙浓度垂线分布规律。

恒定均匀挟沙水流中悬沙的垂线分布，可用 Rouse 公式^[4,17]表达：

$$\frac{C}{C_\alpha} = \left(\frac{\frac{h}{z} - 1}{\frac{h}{\alpha} - 1} \right)^{\frac{\omega_s}{\kappa u_*}} \quad (8)$$

式中： C 是实测悬沙浓度 (g/L)； C_α 是参考悬沙浓度 (g/L)； α 是参考距离 (m)，正确地确定 α 值，涉及推移质和悬移质的分界； h 是水深 (m)；

$\frac{\omega_s}{\kappa u_*}$ 定义为泥沙悬浮指标，悬浮指标确定了泥沙在垂线上分布的均匀程度，即其值越小，则悬移质分布越均匀； $\kappa = 0.4$ 为 Karman 数； u_* 为底床的摩阻流速； ω_s 为悬沙沉降速度 (m/s)； z 为底床以上的高度 (m)。

假定悬沙沉降速率沿水深恒定，对 Rouse 公式等号两侧取自然对数，可得：

$$\ln C = \ln C_\alpha + Z^* \ln \left[\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right] \quad (9)$$

其中 $Z^* = \frac{\omega_s}{\kappa}$ ；当测点位置固定时，同一时刻 $\ln C_\alpha$ 沿水深为常数，以 $\ln \frac{h-z}{z}$ 为自变量， $\ln C$ 为因变量，点绘曲线关系，即可求出 Z^* 及悬沙沉降速率。

在这里尝试利用 Rouse 公式和实测水文资料 (6 点法) 计算得到 CSW 测点不同年份及 2011 年 8 月不同测点的有效沉速 (表 1, 2)^[18]。如前所述，Rouse 公式仅适用于挟沙条件为平衡状态时，且假定沉速沿水深恒定，其自身无法剔除平流和起悬泥沙带来的影响，同时在底部参考距离、含沙量、摩阻流速、卡门常数等取值上均存在很多争议的地方，该方法存在较多争议。其所得到的有效沉速能否直接取代沉速，很值得深究。

表 1 CSW 测点不同年份洪季悬沙 Rouse 有效沉速

日期	有效沉速/ (mm · s ⁻¹)	潮平均含沙量/ (kg · m ⁻³)	潮平均盐度/ ‰
2002-08	5.91	0.9	8.2
2008-08	8.31	1.4	8.3
2009-08	4.90	1.0	4.5
2011-08	6.92	1.9	6.8

表 2 2011 年 8 月长江口北槽 Rouse 有效沉速

站点名称	有效沉速/ (mm · s ⁻¹)	平均含沙量/ (kg · m ⁻³)	平均流速/ (m · s ⁻¹)	平均盐度/ ‰
CS0	2.97	0.41	0.93	0.96
CS1	3.04	0.67	1.01	1.45
CS2	5.96	1.41	1.06	3.76
CS3	4.89	1.29	1.13	11.06
CSW	6.92	1.90	1.19	6.81
CS4	3.49	0.46	1.09	20.86
CS5	3.65	0.21	1.00	26.21
CS6	7.46	1.35	1.29	4.67
CS7	3.64	0.97	1.38	14.18

1.4 麦克劳林公式^[19]

根据沙量连续方程式可得：

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\omega}S)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

对水深 z 积分得，

$$(\bar{\omega}S)_{z=h} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h S dz \quad (11)$$

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 处的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 $t_{0.5}$ 内的平均值，得水深 h 处的断面平均沉速即为群体沉速：

$$(\omega_{50\%})_{mc} = \frac{1}{t_{0.5}} \int_0^{0.5} \omega_i dt \quad (12)$$

麦克劳林公式类似于欧拉法，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，中值沉速算法较为简单，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, 非常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, 来详细介绍沉速计算方法和过程^[20]。

1) 首先直接得到的是不同时刻沉降筒内的含沙浓度剖面(图1), 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。

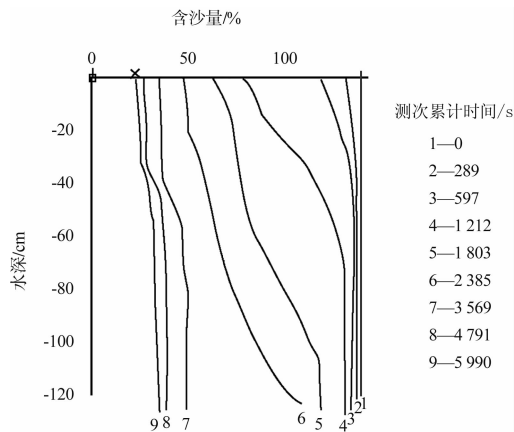
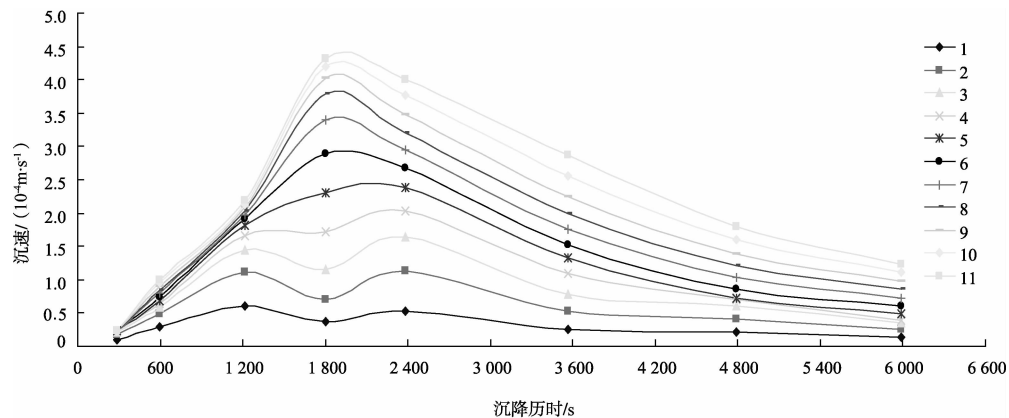


图1 不同时刻含沙浓度

2) 根据图1, 利用式(11)就可计算不同水深处、不同时刻的瞬时沉速(图2)。

3) 根据图2, 利用式(12)就可计算不同水深处的群体沉速(图3)。

4) 根据泥沙垂线连续方程(式(10)), 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, 取最后1层(图3中第11层)的群体沉速代表该组沙的代表沉速。



注: 不同线条代表不同水深处的瞬时沉速。

图2 沉降过程中不同垂线位置的瞬时沉速

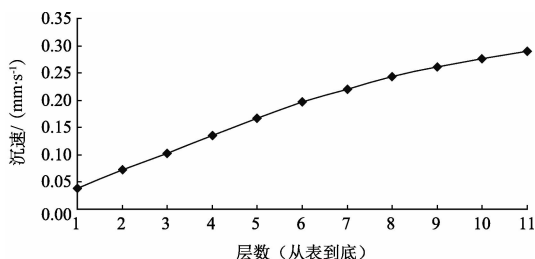


图3 群体沉速与沉距的关系

2 结论

1) 根据分析, 由于考虑的因子较少, 武水公式、Stocks 公式等都不适用于细颗粒泥沙沉速的计算。

2) 劳斯(Rouse)公式拟合法计算所得沉速较常规认识中的值一般偏大很多, 其原因在于该

法难以剔除由于垂向对流扩散及动力条件所导致的泥沙向下运动的成分。

3) 以含沙量、盐度等为变量的泥沙沉速经验公式,不同研究者得到的结果或者公式的参数差异较大;在没有确认其计算条件、计算方法、测量工具前,需谨慎选择,不能简单吸纳。尤其是在盐淡水混合的潮汐环境下,其相关关系和影响因子具有较强的特定性。

4) 麦克劳林公式计算细颗粒泥沙沉速,理论性和物理意义较强,也能符合标准的沉速定义,具有一定的推广价值;但前提条件是要理解细颗粒泥沙的非等速沉降特性及破解沉速-沉距相关依赖关系。

5) 潮汐环境下细颗粒泥沙沉降特性还有待进一步科学客观的研究和探索。

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] Guan W. Transport and deposition of high-concentration suspensions of cohesive sediment in a macrotidal estuary [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2003.
- [3] Van Leussen W. Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport [D]. The Netherlands: Utrecht University, 1994.
- [4] Shi Z, Zhou H J. Controls on effective settling velocities of mud flocs in the Changjiang Estuary, China [J]. Hydrological Processes. 2004, 18(15): 2 877-2 892.
- [5] Winterwerp J C. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment [J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(3): 309-326.
- [6] Wu W, Wang S S Y. Depth-averaged 2-D calculation of tidal flow, salinity and cohesive sediment transport in estuaries [J]. International Journal of Sediment Research, 2004, 19(3): 172-190.
- [7] Krone R B. Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes [R]. California: Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, 1962.
- [8] Mehta A J, Hayter E J, Parker W R, et al. Cohesive sediment transport: I Process description [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(8): 1 076-1 093.
- [9] Xia X. M, Li Y, et al. Observations on the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Pearl River Estuary, China [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(16): 1 809-1 826.
- [10] 王尚毅. 细颗粒泥沙在静水中的沉降运动[J]. 水利学报, 1964(5): 20-29.
- [11] 周永洽, 朱嗣先, 王尚毅. 细颗粒泥沙在静水中的沉降运动[J]. 水利学报, 1965(5): 73-77.
- [12] 严镜海. 群体泥沙静水沉降的阻力分析[J]. 泥沙研究, 1982(3): 52-58.
- [13] 黄建维. 黏性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 1981(2): 30-39.
- [14] 张世奇. 黄海口及三角洲冲淤演变计算原理及方法[J]. 泥沙研究, 1997(2): 23-26.
- [15] Manning A J, Langston W J, Jonas P J. A review of sediment dynamics in the Severn Estuary: Influence of flocculation [J]. Mar Pollut Bull, 2010, 61: 37-51.
- [16] 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.
- [17] Rouse H. Experiments on the mechanics of sediment suspension[C]//USA: Proceedings of the 5th International Congress for Applied Mechanics, Cambridge, Massachusetts. 1938: 550-554.
- [18] 沈淇, 顾峰峰, 万远扬. 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(2): 88-93.
- [19] McLaughlin R T. Settling Properties of Suspensions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1961, 126(1): 1 780-1 786.
- [20] 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.

(本文编辑 武亚庆)