



潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评 ——基本概念与研究方法*

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: 在河口海岸研究领域, 泥沙沉降速度是泥沙研究基础理论体系中一个最基本、最核心的物理量, 它是直接表征泥沙动力学特征和影响河床底部淤积通量最重要的控制参数之一。综述分为3篇, 第1部分主要从沉降定义入手分析, 厘清基本概念, 总结分析了细颗粒泥沙沉降速度研究方法。到目前为止, 细颗粒泥沙沉降过程的环境敏感性特征已经得到普遍的认可, 脱离一定的沉降环境, 纯粹而笼统地认为向下运动的速度是对细颗粒泥沙沉降速度的曲解。在理论计算、室内试验和现场测量3类研究手段中, 建议采用室内试验方法, 但测控设备需进一步改进。

关键词: 潮汐环境; 细颗粒泥沙; 沉降速度; 动水沉速; 研究方法

中图分类号: TV 856

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0018-06

Settling velocity of fine sediment in a tidal environment 1: Definition & study methods

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: Settling (falling) velocity, which is a sensitive and fundamental parameter for each sedimentary researcher, determines the vertical dynamics of sediment and the near-bed deposition flux directly, and its accurate determination has been regarded as a top priority in improving numerical models and understanding of fine sediment transport. During the past studies, hundreds of empirical or semi-empirical formulae are proposed by different laboratory experiments, in-situ observations or theoretical analysis. Even though, it's also very hard for the engineers to choose a suitable and self-confident varied or definite value of fine sediment velocity. Based on extensive domestic and abroad literature study, we present a review on the topic of methods, factors and empirical formulae of the fine sediment settling velocity.

Key words: tidal environment; fine sediment; settling velocity; turbulence-impacted settling velocity; study method

泥沙沉速是泥沙研究基础理论体系中一个最基本、最核心的物理量, 它是直接表征泥沙动力学特征和影响河床底部淤积通量最重要的控制参数之一。

对于粗颗粒泥沙而言, 对其沉降规律的认识较为清晰, 沉降速度一般主要与粒径、水体黏性等因子成较为单一的影响关系。但是对于细颗粒泥沙来说(尤其在潮汐环境下), 由于天然沙中

黏性组分的存在, 悬浮于水中的细颗粒泥沙因分子力作用凝聚成絮团状集合体(即絮凝现象), 由于絮凝发育过程及絮凝沉降对于其周围环境和条件的高度敏感性, 这就使得细颗粒泥沙的沉降规律变得较为复杂, 且一直争议较大。值得指出的是, 至于天然沙粒径多细方为细颗粒泥沙, 很难有准确的界限, 它与具体泥沙成分和水体环境相关, 对于非均匀沙而言, 一般以 D_{50} 在30~60 μm

收稿日期: 2013-08-19

*基金项目: 国家自然科学基金(41206072); 国家科技支撑计划(2013BAB12B00)

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。

为界限。

在国内外不同文献上可以见到以室内试验、现场观测、数学模型和理论推导等为基础的大量细颗粒泥沙沉降速度经验公式。不同的公式形式差异巨大,选取的自变量不同,计算方法、理论基础等均差异很大;再加上泥沙研究学科相关参数的地域性与经验性较强,因此在不同的工程实践中,选择一个合适的泥沙沉速是一件非常令人困惑的事情。

研究分3部分,拟在大量文献调研的基础上,厘清并梳理相关概念、方法和影响因子,分析不同的研究方法,比选不同的计算公式及系统地总结前人在细颗粒泥沙沉降速度的影响因子上已经取得的基本认识,并在此基础上提出了未来进行此方面研究的方向。

本文为第1部分,以基本概念为切入点,系统介绍和评述国内外研究细颗粒泥沙沉降问题所采用的不同研究手段。

1 基本概念

根据《泥沙运动力学》^[1]及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]中的对泥沙沉速定义则更为苛刻:在无限深度静止的、水温为24℃的纯净水中,密度为2.65 g/L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。标准的物理定义中涉及到的几个要点是:1)静水;2)单颗粒;3)等速下沉;4)标准水质、温度与密度;5)重力与流体黏滞阻力达到动态平衡。

但是对于较细颗粒泥沙或者黏性泥沙,上述定义似乎已失去意义(尤其是对单颗粒和纯净水的要求)。很多研究^[4-6](室内试验或现场观测)表明,当天然非均匀泥沙中黏性成分(粒径小于4 μm)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的变化。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,在天然或者实验室水体中可以很容易地分辨出来,单个细颗粒既难以从沙样中取出,入水后也非常难以辨识;水温、水质、盐度、含沙量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;由于细颗粒泥沙沉降时间都受到周围环境的影响,而环境也会因沉速的变化而改变,在这样的相互作用机制下,等速沉降过程基本不可能达到。

此外,在国内的相关文献中^[7-9],不论是细颗粒泥沙还是粗颗粒泥沙,经常可见“动水沉速”这个概念,或者在若干数值模拟中,甚至人为引入一个经验系数,考虑所谓对静水沉速的修正,认为在实际的水流环境中,泥沙的自然下降速度会因水流运动而改变,绝大多数持有此观点的人甚至认为所谓的动水沉速大多小于静水沉速。在国外文献中虽没有明确提出动水沉速这个概念(否则会导致与前述泥沙沉速的物理定义相矛盾),而提出的是“现场沉速^[4,10]”,同样推崇需考虑水流紊动对静水沉速的修正。通过现场和室内试验认为^[10]:在一定的紊动强度范围内水流紊动会增强絮凝导致沉速增加(即动水沉速大于静水沉速);当紊动强度超过一定范围时,紊动就会对泥沙絮团或絮网结构产生破坏效应,导致沉速减弱,即动水沉速小于静水沉速。考虑紊动对静水沉速的影响并没有本质性的错误,问题在于如何理解紊动、沉降与泥沙动力过程的关系,如何从更深层次理解和考虑紊动与沉降过程间的物理效应,如何让相关概念更清晰化。

所谓紊动对沉速的影响或修正,从微观来讲,无非是由于涡团尺度或者紊动动能的改变使得垂向紊动扩散能力和流体的紊动黏性有所变化,这会加强或者减弱泥沙颗粒的碰撞概率,影响絮团尺寸和结构。这个物理过程中每一步都非常定性,很难定量考虑这些微观特性。不过值得注意的是,在考虑紊动对水动力和泥沙动力过程的影响时,紊动与物质运输的相互作用是挟沙水流或者盐水动力过程非常重要的物理特征,例如其中的浮力效应、紊动抑制效应、拖曳力减阻

效应等，是“高级”的细颗粒泥沙运输模型必须考虑的核心问题，也是常规理解的细颗粒泥沙动力过程复杂性的核心体现之一。同样由于对这些现象的了解还很不深入，大多只能通过简单现象或概化过程的描述来实现，暂无法了解其详细的微观物理或者化学过程，也就是“忽略过程重视结果”，在这个追求影响结果的过程中，紊动对沉速的这种影响是否已然被囊括进去呢？除此之外，泥沙沉降过程（静力学因子）也会与紊动及水动力（动力学因子）等一起协同参与到水沙动力过程中去。因此是否可以通过切断这种常规理解上的紊动对细颗粒泥沙沉速的影响来明晰这个复杂的物理过程呢？

在细颗粒泥沙动力过程中，絮凝沉降及由紊动抑制导致的层化现象是含沙量剖面发生变化的两个重要因子；同时含沙量剖面的变化也会导致沉速和紊动强度的变化。但是，若建立如图1虚线所示的相关关系，就会让这三者的关系更为复杂。实际上在图中也可以看到，紊动如果说影响沉降的话，它应该是一种间接的方式：先改变垂线含沙量、盐度剖面等，让这些因子再去影响絮凝沉降。

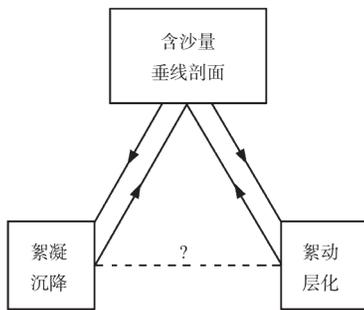


图1 紊动、沉降及含沙量垂线剖面间的相互关系

此外，需要指出的是，在原始的定义中明确指出“静水”意义还在于：“不是任何条件下，泥沙沉速等于泥沙颗粒垂直向下运动的速度”，泥沙沉速属于某种泥沙特有或固有的物理属性，水流或者紊动作用对沉降过程的影响不属于其所定义的沉降过程的范畴，这种影响会在水动力过程和泥沙运动中予以考虑，而非混为一谈。

显然，如果回归到对泥沙沉速原始定义，

其本质是从静力学角度来定义的一种基本物理特性；考虑动力学因子对静力学物理量的影响会使所有因子交织在一起，使问题复杂化且影响因子被多重考虑。如果切断这种假设的关系，会大大简化对细颗粒泥沙动力过程的理解，使相关概念和机理更加清晰。

2 研究方法

对于细颗粒泥沙来说，沉降速度不能通过“距离-时间”来直接测定，因此就只能采用各种间接的方法。在泥沙研究领域，关于选用何种方法或者设备来研究细颗粒泥沙的沉降速度，本身就是一个一直在研究的重大课题。

通过试验或现场手段得到细颗粒泥沙沉降速度的方法非常多，国内外研究者从未间断过对此参数的深入探讨，尤其是随着相关测控仪器的不断升级，相关试验方法和测控手段也一直在不断升级改造中。国内外常见的研究方法按理论、室内与现场分类。

2.1 理论方法^[11]

1) 基于Smoluchowski^[12]絮凝动力学模型和分形理论的方法。2) 基于化学方法的絮团聚与分散方法^[13]。3) Lattice Boltzmann^[14]方法。这些方法多是基于若干刚性理论假设，通过考虑布朗运动、流体剪切和流体紊动等作用对絮团的发育和破碎的影响，利用数学模型对细颗粒泥沙絮凝沉降过程进行模拟。此类方法最大缺陷在于认为细颗粒泥沙运动与分子运动类似。要注意的是，细颗粒泥沙的大小和分子大小远不在一个数量级，泥沙颗粒运动虽然也属于微观现象，但远未达到分子运动的水平。同时，细颗粒泥沙絮凝破坏与发育过程及紊流状态等中微观物理状态和过程的描述尚很不成熟，其中若干参数和公式经验性、假设性太强，难以直接推广使用；且理论分析的结果缺乏严密试验和实测资料的验证。4) 此外还有Stokes公式^[1]、Rouse公式^[2]等。

2.2 室内试验^[15]

1) 底抽管法。底抽管法通过抽取底部泥样来估算筒内剩余沙量，误差较大，且忽略了筒内泥

沙的垂线分布。

2) 重复深度吸管法,即迈克劳林(McLaughlin)法。重复深度吸管法基于泥沙质量守恒原理或沙量平衡原理,理论基础和物理意义较强,近年来被国内外细颗粒泥沙研究者广泛接受。其缺陷是:不停取水样会干扰自然沉降过程;含沙量较高时,取水时边壁效应及局部动力环境使得取得的含沙量并非实际的含沙量;试验步骤繁琐费时;根据不同时刻的含沙量垂向剖面所推算的沉速值是随时间和沉距变化的,选取代表值难度较大。

3) 浑液液交界面法(密度计法)^[16]。浑液交界面沉降目测法单纯地把交接面的沉速当成泥沙沉速缺乏相关理论依据,且该试验仅适用于浓度较高出现清晰泥浆面时。

4) 环形水槽法^[8]。环形水槽法由于沉降距离太短,且无法预知泥沙起悬或者平流等对沉降通量的影响。另外还有沉沙池法。

2.3 现场测量^[17]

1) Owen沉降管法^[18](含若干其它研究者的改进版本:Baystoke tube,RWS tube,QUISSET tube,Bigdan tube,BEAST等);2) ADV法^[19];3) INSSEV系统^[20-21]、VIS系统、FCA系统、VISTA系统、PIV等利用拍照原理的现场沉速测量系统;4) 现场沉降筒+OBS法;5) LISST等激光法^[22];6) INSSECT系统三脚架法;7) 全息照相法;8) 基于非接触式动态称重的SEDVEL系统^[17]。

近年来,国外已越来越趋向于利用现场仪器来获得细颗粒泥沙的沉降速度,虽取得一定进展但效果也并不理想。其主要原因在于:1) 现场沉速测量作业中极容易破坏絮团结构,尤其很多现场沉降管都是横向取样,待取出水面后再竖直放置,这样瞬时的水体扰动会大大干扰自由的沉降过程。2) 很多现场试验中,均是采用获取絮团粒径大小、含沙量和密度等参数后再利用Stokes滞留区公式、武水公式、Rouse公式等来间接求得泥沙沉速,这样的做法高度依赖于相关公式能否精确把握细颗粒泥沙的沉降物理过程及相关影响因素,而实际上不论是Stokes公式或者Rouse公式

等均基于一系列假设条件且自身还有一些经验参数,这些假设与实际现场测量时的环境不一定能符合,因此很多采用这样方法得到的泥沙沉速差异甚大且有些结果在数量级都难以把握。3) 基于现有的观测水平,当含沙量高到一定程度时,即使采用光程缩短器或者相关放大、稀释手段,絮凝体已无法分辨或已经破坏,此外,在絮凝沉降过程中,随着颗粒周围环境的变化,絮凝体一直在发生“解体-重组”的循环变化,如何选择一典型时刻的絮团大小代表絮凝粒径也非常困难。4) 絮凝沉降的影响因子复杂^[23],在现场环境中很难剥离单因子的影响,与粗颗粒泥沙沉降不同,絮凝沉降过程永远无法脱离特定的沉降环境和条件。5) 现场沉降速度的测量多半已经完全超越了泥沙沉速的基本定义,实际能否直接应用在数学模型或者物理模型中值得商榷。6) 现场试验设备依赖相关精密仪器,多造价较高且较为笨重,操作使用不太方便、维护保养代价较高。

3 方法对比

表1列举了部分国内外研究者得到的细颗粒泥沙沉降速度。由于不同学者考虑的具体因素各异,加之试验的具体方法各不相同,泥样、水样来源不同,测量仪器、计算方法等千差万别,所以得出的沉速不尽一致,差异甚大。

4 结论

1) 在潮汐环境下,由于絮凝现象的出现,细颗粒泥沙的沉降特性与粗颗粒完全不同。

2) 泥沙沉速是属于静力学范畴的泥沙颗粒基本物理属性,泥沙颗粒向下的运动速度不完全等同于泥沙沉速,这里面可能有宏观或微观动力因子的贡献。

3) 爱因斯坦原则:“科学的理论、原则和方法应当是尽量简单,但不是更简单”。在一个复杂的物理过程中添加更多的影响因子或相关机制,看起来似乎会增强该物理过程的总体性能;但实际上不尽然,因为每增加一个因子就至少带来了一个新的不确定性。更重要的是,该因子如果自身的参与角色存疑,那更会让复杂的问题

表1 前人研究的细颗粒泥沙沉速

研究者	发表时间	试验类型	沙样来源	测量仪器	公式或方法	含沙量范围 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	沉速/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
李九发 ^[24]	1994	现场	北槽	六点法	Rouse公式		0.2~1.5
时钟 ^[25]	2004	现场	北槽	声学仪器	Rouse公式	0.1~0.4	0.1~3.0
陈沈良 ^[26]	2003	现场	南汇边滩	六点法	Rouse公式	0.65~1.55	2.14~4.38
程江 ^[27]	2005	现场	徐六泾	LISST	Stokes公式	小于0.1	0.7~5.62
唐建华 ^[28]	2007	现场	南槽	LISST	武水公式	0.1~0.6	0.3~1.7
邵宇阳 ^[29]	2011	现场	白茆沙	LISST	Stokes公式	0.2~1.3	1~4
Plus ^[30]	1988	现场	Elbe河口	Owen管	底抽管法	0.1~1	2~3
Manning ^[20]	2010	现场	Severn河口	INSSEV	底抽管法	0.1~70	0~3
Zhang ^[13]	2011	理论			Lattice Boltzmann法	0.3~1.5	0.02~0.04
韩乃斌 ^[31]	1983	室内	北槽	沉降筒	重复深度吸管法		0.35~1.01
黄建维 ^[32]	1984	室内	连云港	沉降筒	重复深度吸管法	0.94	0.03
赵龙保 ^[33]	1993	室内	北槽	环形水槽	动水沉速	1~20	0.005~0.28
金鹰 ^[8]	2002	室内	长江口	环形水槽	重复深度吸管法	0~25	0~0.23
张庆河 ^[34]	2005	室内	黄骅港	沉降筒	底抽管法	0.2~1	小于0.4
金文 ^[35]	2005	室内	陈行水库	PIV	直接观测	0.1~0.14	0.21
尹涛 ^[36]	2008	室内	横沙	沉降筒	重复深度吸管法	3.32	0.001~0.91
白玉川 ^[37]	2011	室内	海河口	量筒	密度计法	3~100	0~0.2
Manoochehr ^[38]	2011	室内	Dez	沉降筒	重复深度吸管法	3.5~30	0.1~2

更为杂乱。絮凝和紊动的首要关系是主动因子与被动因子的关系，且两者分属于静力学和动力学范畴。尽管两者存在关联，那应该在第二个过程（动力过程）中予以考虑，而非第一个过程（沉降过程）。因此，笔者建议在絮凝沉降过程中，毋需考虑来自紊动的影响。

4) 由于对泥沙絮凝机理的认识不足，理论方法不适用于确定细颗粒泥沙沉速；现场测量中诸多条件无法保证，相关因子难以准确控制，不确定性较大，因此也不建议采用；室内试验能在一定程度上保证相关因素的可靠性和可控性，建议采用。但现行的测控设备还需进一步改进。

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. Engineering Manual 1110-2-4000[M]. Washington: US Army Corps of Engineers, 1995.
- [4] Winterwerp J C, Van Kesteren W G M. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment [M]. The Netherlands: Elsevier, 2004: 56.
- [5] Agrawal Y C, Pottsmith H C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport [J]. Marine Geology, 2000, 168: 89-114.
- [6] Ekama G A, Barnard J L, Barnard J L. Secondary Settling Tanks: Theory, Modelling, Design and Operation [M]. London: International Association on Water Quality, 2006.
- [7] 彭瑞善, 李慧梅, 刘玉忠, 等. 泥沙的动水沉速及对准静水沉降法的改进[J]. 泥沙研究, 1997(2): 74-78.
- [8] 金鹰, 王义刚, 李宇. 长江口黏性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 61-63.
- [9] 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(1): 18-24.
- [10] Van Leussen W. Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport[D]. The Netherlands:

- Utrecht University, 1994.
- [11] 杨铁笙,熊祥忠,詹秀玲,等.粘性细颗粒泥沙絮凝研究概述[J].水利水运工程学报,2003(2):65-77.
- [12] Winterwerp J C. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment[J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(3): 309-326.
- [13] Zeidan M,Xu B H,Jia X,et al. Simulation of aggregate deformation and breakup in simple shear flows using a combined continuum and discrete model[J].Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(12): 1 645-1 654.
- [14] Zhang J F, Zhang Q H. Lattice Boltzmann simulation of the flocculation process of cohesive sediment due to differential settling[J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(S10): 94-105.
- [15] 庞玲,张科利,朱明,等.泥沙沉降速度实验研究方法回顾与评述[J].人民黄河,2006,28(5):50-52.
- [16] 李富根,杨铁笙.粘性泥沙浑液面沉速公式研究现状及展望[J].水力发电学报,2006,25(4):57-61.
- [17] Mantovanelli A. A new approach for measuring in situ the concentration and settling velocity of suspended cohesive sediment[D]. Australia: James Cook University, 2005.
- [18] Owen M W. The effects of turbulence on the settling velocity of silt flocs [C]// International Association for Hydraulic Research. Congress.Hydraulic Research and Its Impact on the Environment. Paris: Societe hydrotechnique de France , 1971.
- [19] Maa J P Y, Kwon J I. Using ADV for cohesive sediment settling velocity measurements [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 73: 351-354.
- [20] 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.
- [21] Eisma D, Bale A J, Dearnaley M P, et al. Intercomparison of in situ suspended matter (floc) size measurements [J]. Journal of Sea Research, 1996, 36(1-2): 3-14.
- [22] Mikkelsen O, Pejrup M. The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity [J]. Geo-Marine Letters, 2001, 20(4): 187-195.
- [23] 张庆河,王殿志,吴永胜,等.黏性泥沙絮凝现象研究评述(1):絮凝机理与絮团特性[J].海洋通报,2001,20(6):80-90.
- [24] 李九发,时伟荣,沈焕庭.长江河口最大浑浊带的泥沙特性和输移规律[J].地理研究,1994,13(1):51-59.
- [25] 时钟.长江口北槽细颗粒悬沙絮凝体的沉降速度的近似估计[J].海洋通报,2004,23(5):51-58.
- [26] 陈沈良,谷国传,张国安.长江口南汇近岸水域悬沙沉降速度估算[J].泥沙研究,2003(6):45-51.
- [27] 程江,何青,王元叶.利用LISST观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布[J].泥沙研究,2005(1):33-39.
- [28] 唐建华.长江口及其邻近海域黏性细颗粒泥沙絮凝特性研究[D].上海:华东师范大学,2007.
- [29] Shao Yuyang, Yan Yixin, Maa Jerome Pea-Yea. In-situ measure settling velocity of the cohesive sediment near Baibao Shore in Changjiang Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 2011, 137(3): 372-380.
- [30] Puls M, Kuehl H, Keymann. Settling velocity of mud flocs: results of field measurements in the Elbe and the wester estuary[C]. Netherlands: Physical Processes in Estuaries, 1988: 404-424.
- [31] Han N B, Lu Z Y. Settling properties of the sediments of the Changjiang Estuary in salt water[C]// Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf. China: China Ocean Press, 1983: 483-493.
- [32] 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.
- [33] 赵龙保.黏性泥沙在流动盐水中的沉降试验研究[J].海洋通报,1995(3):27-33.
- [34] 张庆河,张娜,胡喆,等.黄骅港泥沙静水沉降特性研究[J].港工技术,2005(1):1-4.
- [35] 金文,王道增. PIV直接测量泥沙沉速试验研究[J].水动力学研究与进展: A辑, 2005(1): 19-23.
- [36] 尹涛,邵宇阳,童朝锋.长江口细颗粒泥沙沉降试验研究[J/OL].中国科技论文在线,2008:1-6(2008-07-28) [2013-04-01]http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200807-516.
- [37] 白玉川.河口泥沙运动力学[M].天津:天津大学出版社,2011.
- [38] 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.