

徐六泾站悬移质含沙量比测与精度分析

张志林¹, 高敏², 廖建英¹

(1. 长江水利委员会 长江口水文水资源勘测局, 上海 200136; 2. 交通运输部 长江口航道管理局, 上海 200003)

摘要:通过长江口徐六泾断面大规模的跨越不同水情的现场测流试验,发现利用声学多普勒流速剖面仪(AD-CP)信号推算垂线平均含沙量,与传统值相比,平均相对误差绝对值小于5%,且误差呈正态分布。因此,升级现有的徐六泾浮标测流系统(以ADCP取代现有的ADP),可以实现徐六泾断面的在线实时输沙率监测,填补长江口泥沙站网的空白,为长江口相关规划、设计、科研等提供基础资料。

关键词:声学多普勒流速剖面仪;声反向散射;悬移质含量;精度评估;徐六泾水文站;长江口
中图分类号: P33 **文献标识码:** A

绝大多数河流中沉积物输移的主体为悬移质,长江河口段也是如此。在潮汐河段,监测悬移质输移的传统方法为多船组合同步分层采集水流速度和悬移质水样,经实验室分析和数据处理,得到断面输沙率,进而评估悬沙过境总量。这种方法不但费时费力,受天气和航行船舶的影响较大(测船不能布置在航道内),而且花费很高,自动化程度极低,不可能经常实施。因此,大型河口年过境水量与沙量往往通过上游径流控制站估算,或以模型推算。本文在声学估算含沙量精度方面进行探讨,评估徐六泾浮标系统进行输沙率观测的可行性。

1 测站特性概述

1.1 地理位置

长江河口段徐六泾水文断面,上承澄通河段通州沙水道,下连南北支分汉口,位于现苏通长江大桥上游约2.5 km处,位置示意图1。徐六泾水文站始建于1984年1月,是长江干流距入海口门最近的综合性水文站,目前主要观测项目有潮水位、潮流量、风速风向、波浪、水温。

1.2 断面形态

如图2所示,徐六泾断面呈不对称W形,宽5.67

km(0 m等高线间距,1985国家高程基准,下同),主槽宽约2.35 km(-10 m等高线间距),主深槽偏南(右岸),最深点达-48 m;左滩宽约2.0 km,滩上为新通海沙,沙体宽约1.3~1.4 km(-5 m等高线间距),沙体与北岸之间有新通海沙夹槽,夹槽-5 m等高线,宽约0.3 km;右滩宽约1.2 km,水深较大,是小白茆沙夹槽的进口上侧,断面右滩近岸部分高程大于-5 m的宽度仅为0.45 km。

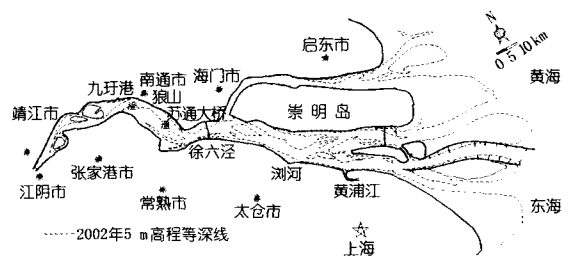


图1 长江口徐六泾站水文观测断面地理位置

1.3 水文要素变化特征

徐六泾断面处于洪水期潮流界以下,是长江口外海潮波向内上溯的咽喉。汛期,断面主槽落潮流速大于涨潮流速;枯期,最大涨潮流速可能大于落潮流速。断面主槽以南底质为淤泥质亚粘土,抗冲击性较强,主槽以北为粉砂,易起动。断面上测点含沙量一般小于

1 kg/m³,盐度在1‰以下。由于断面上落潮流速大、历时长,因此塑造本河段主槽河床形态的主要动力是落潮流。

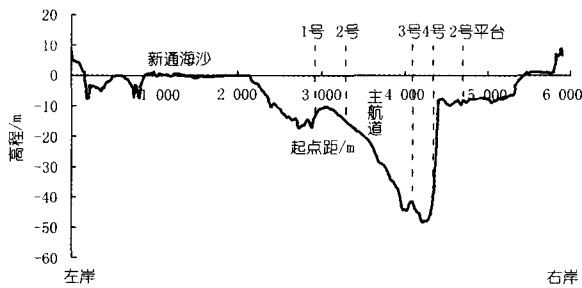


图2 徐六泾站水文观测断面形态

2 声学原理的测沙方法

从声学方法(ADCP)测流原理可知,ADCP输出数据中含有散射体声反向散射的信息,使ADCP具备了观测(计算)垂线(定点测量)或整个断面(走航测量)的悬移质含量(Suspended Sediment Concentration,简称SSC,下同)的潜力^[1]。

由ABS计算SSC的方法是以小颗粒的声散射声纳方程为基础的^[2],通过率定参数将SSC与相对声向散射关联起来,简化声纳方程的指数形式为:

$$SSC_{estimates} = 10^{(A+B \times RB)} \quad (1)$$

式中, $SSC_{estimates}$ 指计算的悬移质含量; RB 为测量的相对声反向散射量; A 为截距; B 为斜率。

3 声学原理测流理论局限性

(1) 单频仪器无法区分是浓度还是颗粒粒径分布发生了变化,所以,粒径分布的变化将会被理解为悬移质含量发生了变化,需要进行额外的率定。

(2) 仪器频率与颗粒粒径分布之间的关系。声学方法的理论基础是瑞利散射模型,该模型严格限于周长与波长的比率小于1的颗粒。对于固定频率的声学仪器而言,这一条件限定了适用的最大颗粒粒径,超出范围之外,SSC的计算误差肯定会增加,声学方法最适宜的颗粒粒径分布范围是几十至几百微米之间。

就徐六泾断面而言,对第1个局限,可以通过取少量水样进行实验室分析解决;而第2个局限,徐六泾断面的悬浮颗粒很少有超过250 μm的粒径,几乎没有大于500 μm的。因此,在徐六泾断面采用声学方法开展悬移质观测存在理论基础。

4 外业数据

4.1 数据收集

考虑不同的水深条件、水情和潮型的影响,共进行了3次比测试验,分别安排在2007年9~10月(中水

期,200709测次)、2008年1月(枯水期,200801测次)和2008年8月(汛期,200808测次),每次测大、中、小全潮,每潮测验时间大于26 h。测次及同期大通站水沙特性统计见表1。

表1 徐六泾断面 ADCP 测沙精度比测时间

水情 (年份)	潮型	时间段	固定垂 线位置	测验期间大 通平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	平均输沙率/ (t·s ⁻¹)
(2007年)	大潮	9月27日12:00~9月28日15:00	2号平台,3号浮标	38 300	7.97
	中潮	9月30日12:00~10月1日18:30			
	小潮	10月4日15:00~10月5日23:00			
(2008年)	大潮	1月10日15:00~1月11日18:30	2号平台,2号浮标	10 254	0.85
	中潮	1月13日12:00~1月14日20:00			
	小潮	1月16日9:00~1月17日11:00			
(2008年)	大潮	8月16日11:00~8月17日13:00	2号平台,2号浮标	40 923	11.55
	中潮	8月20日13:00~8月21日19:00			
	小潮	8月23日6:00~8月24日8:00			

4.2 测验方法

(1) 测量固定垂线时在平台或浮标附近指定位置抛锚,测量断面时动船整点来回观测。

(2) 传统法取样采用横式采样器,水样容积2 000 mL,取样时启动OBS-3A和Lisst-100等自动测沙仪连续记录数据,并记录ADCP测得的流速和声反向散射强度,每0.5 h按6点法采集水样一次。

(3) 不同测次中,分别采用1 200 k、600 k、300 k的ADCP的仪器,探讨不同频率ADCP对计算含沙精度的影响。

(4) 采用ADCP随机软件WinRiver记录坐标、流速、流向、回声强度、方向、姿态、水温、好信号数百分比等。采集水样时,在记录本上标注每个采样点的信号序号,以便在后处理软件中用来与OBS数据和水样分析成果匹配。

4.3 测验期间含沙量特征

3测次水样分析的含沙量特征值统计见表2,可见徐六泾断面含沙量不大,一般在500 g/m³以下。测验期间最大测点含沙量发生在2008年8月21日13:04,2号浮标处底层含沙量为710 g/m³。

5 计算公式

传统垂线平均含沙量采用六点法的流速、含沙量加权计算成果,ADCP通过不同方式标定得到的结果均与该值进行比较。传统垂线平均含沙量计算公式:

$$C_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i C_{si} V_{xi}}{10V_p} \quad (2)$$

式中, C_{sp} 为垂线平均含沙量, g/m³; C_i 为权重系数,从水面至水底分别为1、2、2、2、2、1; C_{si} 为测点含沙

量, g/m^3 ; V_{xi} 为测点流速, m/s ; V_p 为垂线平均流速, m/s 。

表2 比测期间测点含沙量特征值统计

测次	位置	潮型	含沙量/($g \cdot m^{-3}$)	
			最小	最大
200709	2号平台	大	70	296
		中	87	376
		小	49	83
	3号浮标	大	117	274
		中	156	412
		小	59	568
200801	2号平台	大	44	349
		中	63	297
		小	34	90
	2号浮标	大	58	588
		中	65	471
		小	41	135
200808	2号平台	大	43	191
		中	41	259
		小	36	172
	2号浮标	大	41	652
		中	46	710
		小	20	591

当位于憩流附近时,流速较小,流向紊乱,用式(2)计算垂线平均含沙量可能会呈现不合理现象,故仅用测点含沙量加权计算:

$$C_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i C_{si}}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (3)$$

所取的水样按规范中烘干法进行实验室分析,其值作为比较的真值,ADCP所测数据经率定后计算所得含沙量成果与之比较得相对误差:

$$X' = \frac{C_{si}' - C_i'}{C_i'} \times 100\% \quad (4)$$

式中, X' 为相对误差,%; C_{si}' 为计算所得含沙量, g/m^3 ; C_i' 为水样经烘干所得含沙量, g/m^3 。

6 测沙精度比较

本次试验,采用 ADCP 进行了多种方法标定,分别有六点法、三点法、一点法、连时序法等,本文着重介绍六点法。所谓“六点法标定”,即采用水面、 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 和水底 6 层水样分析结果,在 Visea DAS 程序中对 ADCP 声散射信号进行标定,以水样采集开始到结束为一时间段,从输出数据中截取该时间段 ADCP 计算的垂线平均含沙量,与传统六点法成果进行比较。

6.1 不同水情下成果的精度

中水期(200709),垂线平均含沙量介于 $41 \sim 583$

g/m^3 之间,由统计结果可知,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 79.7% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 95.4% ;枯水期(200801),垂线平均含沙量介于 $35 \sim 305 g/m^3$ 之间,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 71.2% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 93.7% ;洪水期(200808),垂线平均含沙量介于 $52 \sim 265 g/m^3$ 之间,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 68.3% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 90.7% 。3 种水情下 ADCP 所得垂线平均含沙量均达到很高的精度,且误差基本呈正态分布。因此可以认为,只要有足够的标定样本(一般 4 点以上),使用 Visea DAS 软件计算所得的 ADCP 测沙成果是可信的。

6.2 不同潮型下成果的精度

同潮型下成果的精度分析仅以 2008 年 1 月所测为例,其余测次精度类似。大潮时,垂线平均含沙量介于 $55 \sim 292 g/m^3$ 之间,由统计结果得知,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 67.6% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 91.4% ;中潮时,含沙量介于 $71 \sim 305 g/m^3$ 之间,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 68.0% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 91.7% ;小潮时,含沙量介于 $35 \sim 163 g/m^3$ 之间,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 83.8% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 98.8% 。3 种潮型下 ADCP 所得垂线平均含沙量均达到很高的精度,且误差呈正态分布。因此可以认为,ADCP 测沙成果不因潮型的变化而在精度上有差异。

6.3 不同位置下成果的精度

因 3 号浮标处水深较深($45 m$)且在航道边缘,因此仅 200709 测次在该处布置了比测垂线,后两个测次,出于安全的考虑,改测 2 号浮标北($15 m$)。3 号浮标处与 2 号平台水深差异最大,故不同位置下的成果精度选用 200709 测次予以分析。

2 号平台处垂线平均含沙量介于 $41 \sim 293 g/m^3$ 之间,而 3 号浮标处介于 $48 \sim 583 g/m^3$ 之间,3 号浮标处较大。从统计结果可知,2 号平台处,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 83.9% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 97.1% ;3 号浮标处,误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 74.5% ,误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 93.3% 。2 号平台处成果稍好于 3 号浮标,但精度显然还在同一个等级上。可见,在徐六泾断面,ADCP 测沙成果不因位置(水深)的变化而在精度上有明显的差异。

6.4 不同频率 ADCP 仪器之间结果比较

对于 200801 测次,曾在 2 号浮标处,同一测船的两侧分别绑定两台不同频率的 ADCP,同步进行 ADCP 测沙试验,后处理采用同一水样分析成果标定。

从图 3 可以看出,两种不同频率的 ADCP 仪器所

得含沙量逐时过程线基本重叠,一致性较好,600k所得含沙量为 138.25 g/m^3 , 300k 所得平均含沙量为 139.55 g/m^3 , 两种仪器 84 个样本之间的平均误差为 8.87 g/m^3 , 约为平均含沙量的 6.4%。若以 600k 计算成果为基准, 300k 的与之相比, 误差在 $\pm 5\%$ 以内的样本占 69.1%, 误差在 $\pm 10\%$ 以内的样本占 92.9%, 可见, 300k 和 600k 两种频率的 ADCP 测沙成果在精度上基本没有明显差异。

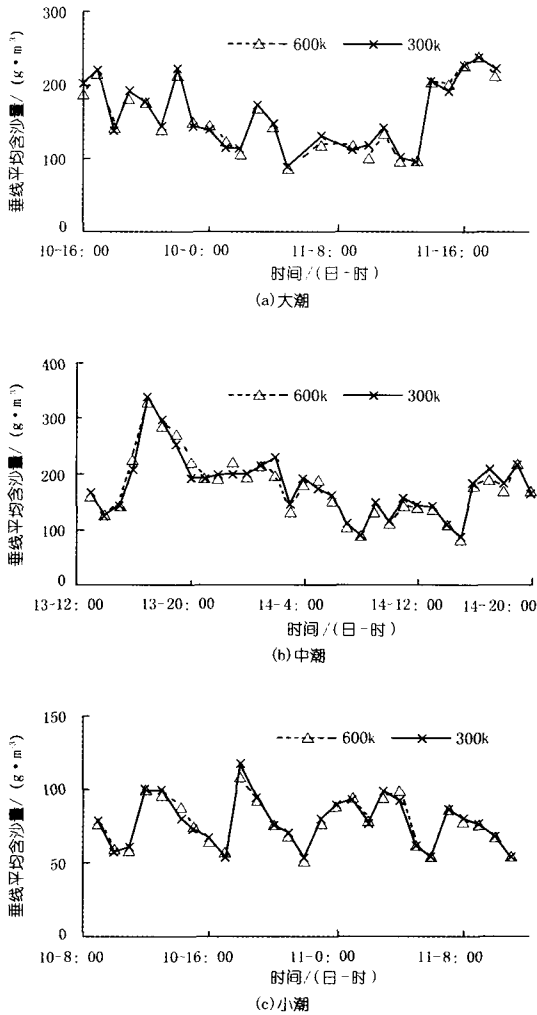


图3 2008年1月不同频率 ADCP 计算的垂线平均含沙量逐时变化

6.5 小结

应用 Visea DAS 软件根据 ADCP 反向散射信号计算悬移质含量, 在徐六泾断面, 不同水情、不同潮型、不同水深、不同频率的 ADCP 仪器(300k、600k)情况下, 通过 ADCP 反向散射信号计算的含沙量成果精度较高, 不存在系统偏差。

因徐六泾水情有一定的特殊性, 洪、枯、中 3 个测次, 最大垂线平均落潮流速为 1.83 m/s , 最大垂线平均涨潮流速为 1.59 m/s , 最大垂线平均含沙量为

0.583 kg/m^3 , 流速中等, 含沙量较小, 粒径基本小于 $250 \mu\text{m}$, 徐六泾断面所得成果对其他水域仅具借鉴意义。

7 误差分析

利用声反向散射信号 (ABS) 计算悬移质含量 (SSC), 虽然学术界在上世纪 70 年代就有了较为成熟的理论, 但具体应用并得到较好的成果还是近几年的事, 目前没有现成的规范条例来指导声学方法计算悬移质含量的误差分析^[3-6]。

本文利用《河流悬移质泥沙测验规范》(GB 50159-92) 和《水文资料整编规范》(SL247-1999) 中的部分误差统计方法, 对徐六泾河段应用 ADCP 的 ABS 进行 SSC 计算的精度予以评估。

7.1 误差统计

将实测的水样分析成果近似视为真值, 计算的 n 个独立量看成是在不同条件下测得的成果, 统计垂线平均含沙量的相对误差、平均相对误差 (系统误差)、标准差等指标。

① 相对误差

$$\delta Y_{Ai} = \frac{Y_{Ai} - Y_L}{Y_L} \quad (5)$$

② 平均相对误差

$$|\overline{\delta Y_A}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta Y_i|$$

(相对差取绝对值, 再平均) (6)

$$\overline{\delta Y_A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta Y_i$$

(相对差带 \pm , 算术平均。系统误差) (7)

③ 标准差 (实测值与真值相比的离散程度, 或称相对随机误差)

$$s_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_{Ai} - Y_L}{Y_L} \right)^2} \quad (8)$$

④ 随机不确定度

$$X'_Q = 2s_e \quad (9)$$

式中, Y_L 为实测水样分析的含沙量 (测点或垂线平均), 近似真值; Y_{Ai} 为 ADCP 声反向散射强度计算的含沙量 (测点或垂线平均); n 为测次总数 (或统计样本总数); X'_Q 为置信水平为 95% 的随机不确定度。

其中, 相对误差是反映计算含沙量与实测含沙量 (近似真值) 接近程度的量, 数值小, 精度高。平均相对误差 (系统) 是指“正确度”, 误差主要来源于仪器、理论和人为误差, 系统误差总是使测量结果偏向一边, 因此, 多次测量求平均值并不能消除系统误差。标准差 (或称相对均方差、变差系数、离散系数 Cv) 是指

“精密度”,反映随机误差大小的程度,即反映观测值的稳定性。

上述的误差没有量纲,以百分率(%)表示,精度统计见表3。

从表3可见,当采用六点法标定时,垂线平均含沙量的平均相对误差的值介于3.04%~3.87%之间,标准差约在5%左右,随机不确定度在10%左右,精度较高。因此,在徐六泾断面采用ADCP进行悬移质含量观测,误差在可控范围内。

表3 六点法标定计算与实测垂线平均含沙量比较精度统计

测次	样本数/个	平均相对误差/%		标准差 s_e /%	随机不确定度($\alpha=5\%$)
		$ \delta Y_A $	δY_A		
200709	300	3.04	0.40	4.48	8.96
200801	257	3.73	0.88	5.24	10.48
200808	161	3.87	1.44	5.68	11.36

7.2 误差来源分析

(1) 横式采样器引起的误差。如仪器内壁不光滑、两端口门不能瞬时同步关闭、容积不准、采样器位置与指定水深有一定的偏差等。

(2) 数据采集方式不一致引起的误差。横式采样器为瞬时式,而ADCP数据为时段平均采样方式(积时式),两者成果之间有一定的脉动。

(3) 仪器操作引起的误差。ADCP信号与水样采集记录不完全同步。

(4) 环境引起的误差。如高速水流、风浪引起水流、悬沙的脉动,涨落潮期悬移质颗粒级配变化等。

(5) 水样处理与分析误差。量具不精确或观读容积不准,抽吸清水可能流失一部分泥沙,天平未定期校正等。

(6) 数据处理误差。除“声学测沙”原理本身的局限外,尚可能存在软件后处理过程中声学参数误差、数据匹配误差、收敛计算误差等。

8 结论

(1) 利用ADCP的声反向散射强度测量悬移质含量,不但不破坏水体的自然特性(非侵入式),且能提供整个剖面的数据,是目前唯一能实现潮汐河段自动在线测量输沙率的技术手段,但其转换计算较复杂,精度需作进一步分析。

(2) 比测分析成果表明:徐六泾断面在不同水情、潮型、水深(位置)、频率的ADCP仪器情况下,只要标定得当,均能得到精度较高的含沙量成果。

(3) 徐六泾断面江面宽阔,水上交通繁忙,难以开展传统法同步精密输沙率测验。下一阶段,有必要选择断面形态单一的测验河段(如大通水文断面),进行ADCP测沙试验,进一步评估应用ADCP的声反向散射剖面计算断面输沙率的精度。

致谢

本项目由长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局和交通运输部长江口航道管理局合作完成,项目依托长江口深水航道治理三期工程开展,在项目进行中得到交通运输部长江口航道管理局范期锦总工程师和谈泽炜处长的指点和帮助,谨以致谢。

参考文献:

- [1] 田洋,刘少华.声学多普勒测流原理及其应用[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [2] 张志林,史芳斌,胡国栋.ADCP反向散射强度估算悬移质浓度的原理及其应用[M].武汉:长江出版社,2008.
- [3] 张叔英,李允武.声学悬浮泥沙观测系统的研制和应用[J].海洋学报,1998,20(5):114-119.
- [4] 郭纪捷,任来发.声学悬浮泥沙观测数据现场定标研究[J].海洋学报,1998,20(5):120-125.
- [5] 汪亚平,高抒,李坤业,等.用ADCP进行走航式悬沙测量的初步研究[J].海洋与湖沼,1999,30(6):758-762.
- [6] 柏秀芳,龚德俊,徐永平,等.声学多普勒剖面仪对悬浮沉积物浓度的测量研究[J].水科学进展,2008,19(4):489-493

(编辑:李慧)

Comparing measurement of suspended sediment concentration at Xuliujing Hydrological Station and its accuracy evaluation

ZHANG Zhilin¹, GAO Min², LIAO Jianying¹

(1. Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of Yangtze River estuary, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China; 2. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Ministry of Transport, Shanghai 200003, China)

Abstract: Through a series of large-scale in-situ experiments in different water and sediment inflow conditions at Xuliujing Hydrological Station in the Yangtze River estuary, we conclude that the average relative error of vertical mean suspended sediment concentration (SSC) from the acoustic back scatter (ABS) of acoustic doppler current profiler (ADCP) is less than 5 percent compared with the traditional method, and the error shows normal distribution. Therefore, upgrading the present buoyed measurement system, which is to use ADCP instead of ADP, can realize the real-time measurement of suspended sediment discharge at Xuliujing Hydrological Station, and we can establish the hydrological sediment network in the Yangtze River estuary as well.

Key words: acoustic doppler current profiler (ADCP); acoustic back scatter (ABS); suspended sediment concentration (SSC); accuracy evaluation; Xuliujing Hydrological Station; Yangtze River estuary