

基于浊度计和 ADCP 的悬沙浓度估计与分析

李晓龙¹, 陈永华¹, 姜静波¹, 倪作涛¹, 刘庆奎², 徐永平¹, 涂登志¹, 李思忍¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 作者采用浊度计和声学多普勒流速剖面仪(ADCP)在近海区域连续、定点观测的应用中, 利用浊度与悬沙浓度之间良好的线性关系, 对潮汐半月周期内的浊度和 ADCP 后向散射声强数据进行相关性分析, 讨论了小、中、大潮期间利用 ADCP 后向散射声强反演悬沙浓度的可靠性, 反演过程中综合考虑了声学近场非球面扩散和本底噪声的影响。结果表明, 在实验海域中, 小潮情况下, 各水层内悬浮泥沙成分较为稳定, ADCP 后向散射声强与浊度变化相关性较高, 达到 0.91; 而在大潮情况下, ADCP 后向散射声强与浊度变化的相关性降低, 悬沙浓度及成分容易在海流的影响下发生变化。

关键词: 声学多普勒流速剖面仪; 浊度; 悬沙浓度; 后向散射声强

中图分类号: P714 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)06-0089-06

doi: 10.11759/hyxx20150217001

悬沙浓度 (Suspended sediment concentration, SSC) 是海洋沉积动力学研究的一个关键参量, 其大小及变化直接体现悬沙的集聚与输运情况, 关系到岸滩、湿地的冲淤、海岸工程设计与防护等。悬沙浓度变化的研究方法可以分为传统方法和现代方法两种^[1]。其中, 传统方法是现场采集水样, 通过对水样过滤和称质量来计算采样水域的悬沙浓度。虽然这种方法是最准确的方法, 但费时费力, 仅能得到几个采样水层深度处少量、离散的悬沙浓度数据。近年来, 越来越多的研究人员利用光学与声学探测特性的现代方法观测悬沙浓度^[1-5]。虽然依据光学原理探测的是浊度, 声学仪器测量的是后向散射声强 (Acoustic Back Scatter, ABS), 但在一定范围内悬沙浓度和浊度 (Turbidity, 简称为 Turb) 呈良好的线性关系 (表 1)^[6-9], 与声学反向散射强度也呈单调增加变化^[9-11]。利用现代观测方法, 悬沙浓度的测量效率有较大提高, 并可获得较高时空分辨率的实时数据。

虽然浊度和声学后向散射都可作为悬沙浓度的替代测量, 但较之而言, 由于光、声在海水中的传播特性, 利用浊度计只能获得探头位置处的悬沙浓度, 而声学遥测技术具有不干扰水体、同时获得水体垂直断面内高空间分辨率数据的优点, 并且能够实现长期、实时、连续性的观测^[12]。然而, 回声强度的测量也会受悬沙成分的影响^[2, 3], 在 ADCP 连续、定点观测应用情况中, 潮汐变化会对悬沙浓度及成分产

生扰动, 因而影响 ADCP 反演悬沙浓度的可靠性。作者通过对潮汐半月周期内的浊度和 ADCP 后向散射声强数据进行对比分析, 考虑 ADCP 连续、定点观测的应用情况, 利用浊度与悬沙浓度之间的线性关系, 分析不同潮汐情况下 ADCP 后向散射声强与海水悬沙浓度间相关性, 研究潮汐状况对 ADCP 反演悬沙浓度可靠性的影响。

表 1 海水浊度与悬沙浓度之间的关系

Tab. 1 Correlation between turbidity and suspended sediment concentration^[9]

文献	研究结果
[6]	$SSC=1.18 \times Turb - 2.32$, $2 \leq SSC \leq 868$ mg/L SSC 单位: mg/L ([7]同), Turb 单位: NTU (下同)
[7]	$SSC=0.92 \times Turb - 0.76$, $10 \leq SSC \leq 1000$ mg/L, $20 \leq Turb \leq 250$
[8]	$SSC=0.00065 \times Turb + 2.78$, $10 \leq SSC \leq 105$ g/L, $50 \leq Turb \leq 150$, SSC 单位: g/L ([9]同)
[9]	$SSC=0.00485 \times Turb - 0.035$, $1.5 \leq SSC \leq 30$ g/L, $0 \leq Turb \leq 35\ 000$

收稿日期: 2015-02-17; 修回日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61505221); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA11040306)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 61505221; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11040306]

作者简介: 李晓龙 (1985-), 男, 山东临沂人, 工程师, 博士, 从事海洋信息探测技术研究, 电话: 0532-82898737, E-mail: lixiaolong@qdio.ac.cn

1 悬沙浓度的声学测量原理

基于水声传播特性测量悬沙浓度是利用散射水体中回声源散射强度的大小与悬浮物浓度的大小成正比^[2]，由于 ADCP 发射声波的散射体主要是水体中的悬浮颗粒，其采集的后向散射声强可用来反演悬浮物浓度。水体声波传播过程中，由于回声球面扩散和介质吸收的存在，在计算散射源处声强时，须考虑声波的几何衰减和吸收因素^[13]，对 ADCP 测量的回声强度进行校正后得到体积后向散射强度。基于声呐方程，ADCP 测量的体积后向散射强度表达为^[14]：

$$S_v = C + 10 \lg[(T_x + 273.16)R^2] + 2aR + K_c(E - E_r) - 10 \lg(L \times P) + 20 \lg(\Psi R) \quad (1)$$

公式(1)中， C 为由 ADCP 仪器性能决定的常数， T_x 探头记录水温， R 为沿换能器波束方向上悬浮散射体到 ADCP 换能器表面的距离， $a = a_w + a_s$ 为海水总的声波吸收系数，其中 a_w 和 a_s 分别为纯海水和水中悬浮物对声波的吸收系数； K_c 是 ADCP 仪器的声强单位转换系数(可由厂家获得或用户测定)， E 为 ADCP 回声强度， E_r 为本底噪声； L 和 P 分别为 ADCP 发射声波的脉冲长度(m)和发射功率(W)； Ψ 为近场校正函数，由于声波在声源近场内成非球状扩散，在小于临界距离 r_n 的水层中，应考虑近场校正^[13]：

$$\psi = 1 + \frac{1}{1.35z + (2.5z)^{3.2}} \quad (2)$$

其中， $z = r/r_n$ 为无量纲的声波传输距离， $r_n = \pi A_t^2 / \lambda$ ， r 为声波传输距离， A_t 为换能器半径， λ 为声波波长。

基于瑞利散射原理，体积后向散射强度 S_v 又可表示为^[14]：

$$S_v = 10 \times \lg(SSC) + b \quad (3)$$

其中， b 为校准因子，ADCP 后向散射声强与悬沙浓度的对数 $\lg(SSC)$ 呈线性关系。

根据公式(1)可知，处理 ADCP 测量的后向散射声强数据时，须要进行本底噪声校正和近场声强校正。另外，后向散射声强会受悬浮物粒径的影响， S_v 与散射体等效粒径的 3 次方成正比^[15]，但实际观测中散射体粒径的测量仍受仪器和实验同步性的限制，如 LISST-100 仪的粒径测量范围为 1.25 μm ~250 μm ，而且在长期、连续性观测中粒径测量无法与 ADCP 数据同步。作者旨在利用浊度与悬沙浓度的线性关系来分析不同潮汐情况下 ADCP 反演悬沙浓度的准确性，故不考虑悬浮物粒径对后向散射声强的影响。作者使用美国 RDI 公司生产的宽带 ADCP，工作频率 600 kHz，其声强数据记录单位为 count，声强单位

转换系数 K_c 和本底噪声强度 E_r 可由 RDI 公司获得^[3]，也可通过水槽实验进行测定。

2 观测方法

考虑近岸的浅水区域处水体表层和底层的悬沙浓度较为接近，不适于分析潮汐情况对 ADCP 反演悬沙浓度的影响，因此，实验站点选定在距海岸最近距离约 14.0 km 处(36°33.900'N、121°24.042'E)，平均水深约 21 m，实验站点位置如图 1 所示。

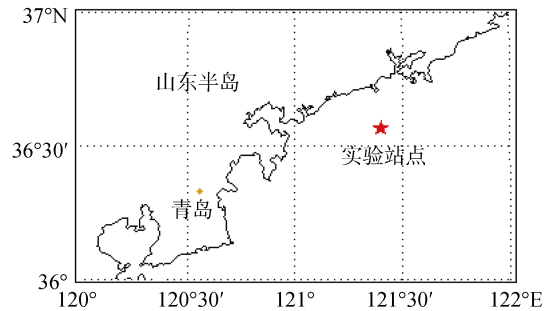


图 1 实验站位

Fig. 1 Experimental observation stations

为了获得半月潮周期的 ADCP 和浊度数据，观测实验自 2014 年 12 月 29 日~2015 年 1 月 7 日，先后在小、中、大潮情况下进行测量，实验中使用综合水质仪(ASTD 仪带有光学浊度探头、以及温、盐、压力等探头)和声学多普勒流速剖面仪(ADCP)，采用 ADCP 坐底观测和定点船载观测相结合的方式。ADCP 采样频率为 1Hz，连续工作时长 10 min，工作间隔 20 min，采样层厚 0.5 m，盲区 1 m，坐底观测时声学换能探头距海底约 0.9 m；综合水质仪计工作频率 2 Hz，观测时设备匀速入水至海底后回收，连续采样时长 7 min，工作间隔 23 min，其计数单位为 FTU，在现代光学测量浊度的仪器中，FTU 与 NTU 一致。仪器采样时间匹配处理后，对各水层的 ADCP 与浊度计数据进行对比分析。

3 数据分析及结果

由于 ADCP 自身带有温度和压力传感器，可准确记录探头处水温以及观测站点的水深变化，结合 ADCP 坐底观测的结构参数，可计算出站位水深。为了有效匹配浊度计和 ADCP 的测量水层，数据处理时取 1.5 m 的水层厚度，即对 ADCP 获取的每 3 层数据进行平均，对应 ADCP 测量水层进行相应浊度数据的选取。并考虑 ADCP 的观测盲区以及水深变化

时气海界面对回声强度的干扰^[16],作者暂不对表、底两水层的回声强度和浊度进行分析。

随着潮汐的周期变化,固定观测点处会出现涨急、涨憩、和落急、落憩,也就是水深和海流流速的相应变化,如图 2 为中潮时站位水深和海流流速随观测时间的变化,各水层的流速变化一致,在涨急和落急时刻海流流速有明显增大。将相应时刻的 ADCP 后向散射声强进行本底噪声校正和近场声强校正后(图 3),由于 ADCP 坐底观测,且选取每层厚度均为 1.5 m,因此图 3 中最底层始终为距海底 3.4 m 处水层。由图 3 可见:随着深度增加,ADCP 回声强度增大,这与浊度随深度变化的普遍现象一致。另外,结合图 2 和图 3 可以发现在涨急时刻会出现 ADCP 回声强度增强的情况,如采样的第 1、第 12 和第 24 小时处,这说明涨急时刻出现悬沙浓度峰值,这

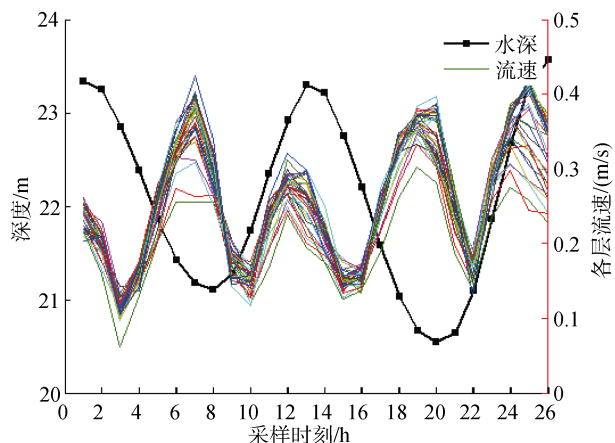


图 2 中潮时站位水深和海流流速随观测时间的变化
Fig. 2 Temporal variation in water depth (m) and current velocity (m/s) of layers during the middle tide

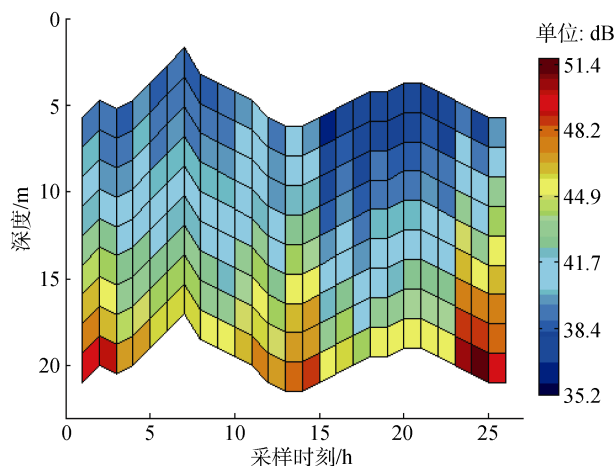


图 3 中潮时校正后的 ADCP 后向散射声强变化
Fig. 3 Calibrated values of backscatter intensity measured by ADCP during the middle tide

与水动力对悬沙浓度变化的影响一致^[17]。

基于海水浊度与悬沙浓度的线性关系,对于退潮、涨潮时刻悬沙水平通量变化可近似用浊度水平通量,即 $Turb \times V_m$ 表示^[9],其中, $Turb$ 单位为 FTU,与单位 mg/L 呈线性关系,流速 V_m 单位为 m/s ,因此,单位 $FTU \times m/s$ 与 $kg/s/m^2$ 呈比例关系。图 4 为中潮期间站位水深和浊度水平通量随时间的变化,这与图 3 中 ADCP 后向散射声强的变化趋势一致。

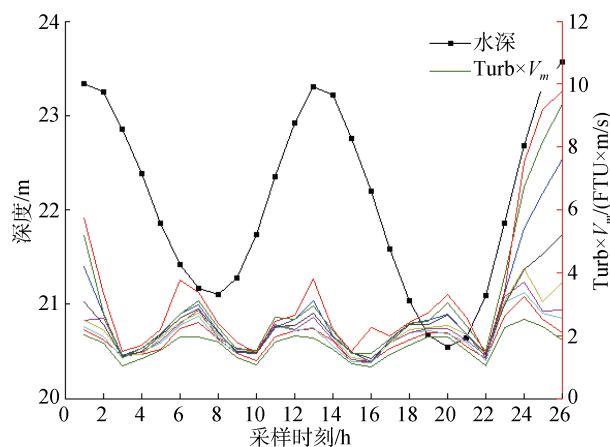


图 4 中潮时站位水深和浊度水平通量随观测时间的变化
Fig. 4 Temporal variation in water depth (m) and $Turb \times V_m$ ($FTU \times m/s$) of layers during the middle tide

根据表 1 和式(3)中悬沙浓度、浊度和 ADCP 后向散射声强的关系,将浊度的对数和校正后的 ADCP 后向散射声强作比值计算,即 $Ratio = 10 \times \lg(Turb) / ABS$,如图 5 所示,第 1 层~第 10 层依次为有表及底的水层,水层厚度为 1.5 m。由图 5 可以看到,第 10 层的比值

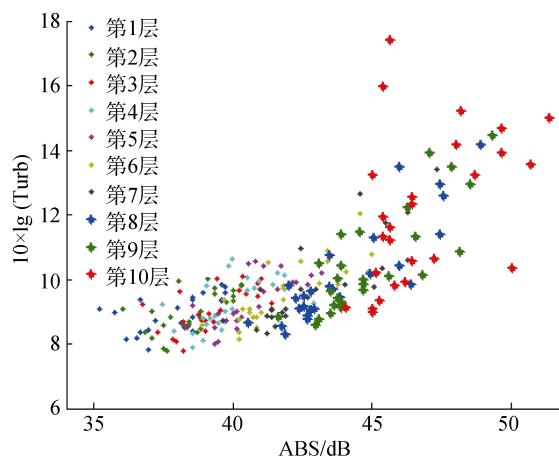


图 5 中潮时观测水层内浊度的对数与校正后的 ADCP 后向散射声强之间的比值
Fig. 5 Relationship between turbidity and backscatter intensity measured in layers during the middle tide

数据发生偏离,这是由于底层水体与上层水体的悬沙成分差异造成的。因此,在分析潮汐变化对 ADCP 反演悬沙浓度可靠性的影响时,去除最底层数据,仅对上层水体数据进行拟合,如图 6~图 8,分别为大、中、小潮期间浊度对数值与 ADCP 后向散射回声强度之间的线性拟合关系,拟合公式如下:

大潮情况下: $10 \times \lg(\text{Turb}) = 0.217 \times \text{ABS} + 0.855$

中潮情况下: $10 \times \lg(\text{Turb}) = 0.307 \times \text{ABS} - 3.07$

小潮情况下: $10 \times \lg(\text{Turb}) = 0.319 \times \text{ABS} - 3.21$

对比大潮数据,小潮和中潮情况下的拟合结果较为接近。

对比图 6~图 8 可见,大潮期间的 Ratio 值最为集中,而小潮期间 Ratio 值最为离散,这说明不同潮汐状况使得水体中的悬沙含量发生变化,由于大潮期

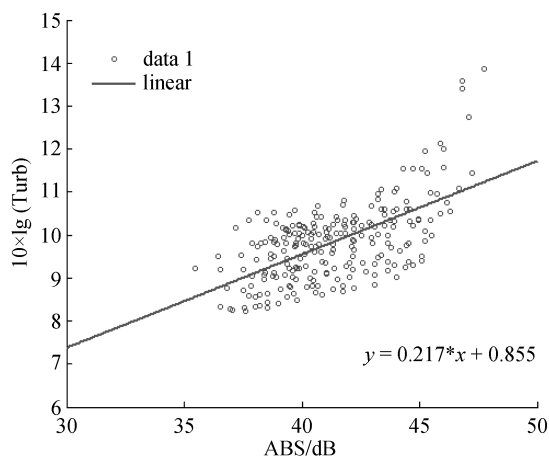


图 6 大潮浊度与 ADCP 后向散射回声强度的关系(相关系数 0.62)

Fig. 6 Relationship between turbidity and backscatter intensity measured by ADCP during the spring tide

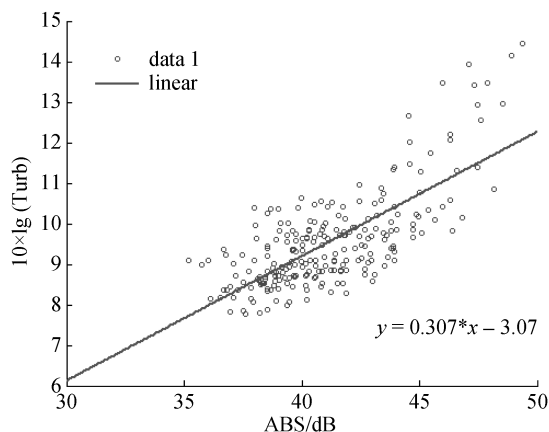


图 7 中潮浊度与 ADCP 后向散射回声强度的关系(相关系数 0.73)

Fig. 7 Relationship between turbidity and backscatter intensity measured by ADCP during the middle tide

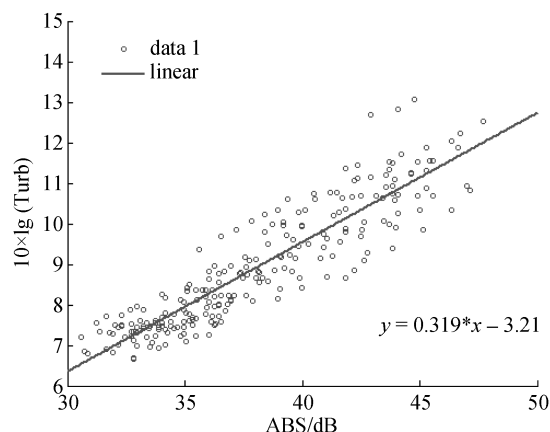


图 8 小潮时浊度与 ADCP 后向散射回声强度的关系(相关系数 0.91)

Fig. 8 Relationship between turbidity and backscatter intensity measured by ADCP during the neap tide

间海流流速较大,对水体各水层的悬浮泥沙产生扰动,使其悬沙成分混杂,造成 ADCP 后向散射声强变化范围比较集中。另外,通过对浊度对数值和 ADCP 后向散射声强变化的相关性分析,对应大、中、小潮期间的相关系数分别为 0.62、0.73 和 0.91(表 2),这表明:相对而言,小潮情况下利用 ADCP 后向散射声强反演悬沙浓度更为可靠。在潮汐半月周期内,由于不同潮汐情况下,潮差变化和海流流速会对水体中的悬浮泥沙含量及成分产生影响,研究表明:对比大潮情况,小潮期间水体各水层内悬浮泥沙成分较为一致,由表层至底层的水体悬沙浓度逐渐增大,而大潮情况下,各水层内悬浮泥沙成分混杂,浊度对数值与 ADCP 后向散射声强的相关性较差,不利于仅利用 ADCP 反演悬沙浓度。

表 2 潮汐半月周期内海水浊度与 ADCP 后向散射声强之间的关系

Tab. 2 Correlation between turbidity and backscatter intensity measured by ADCP during the semi-lunar tidal cycle

潮汛	有效样本数(个)	平均潮差(m)	平均流速(m/s)	相关系数
大潮	234	2.79	0.27	0.62
中潮	234	2.48	0.25	0.73
小潮	234	2.4	0.23	0.91

4 结论

考虑 ADCP 连续、定点观测的应用情况,基于浊度与悬沙浓度之间良好线性关系,利用潮汐半

月周期内浊度和校正后的 ADCP 后向散射声强数据, 对其进行拟合和相关性分析, 对比讨论不同潮汐情况下 ADCP 后向散射声强反演海水悬沙浓度的可靠性。研究表明, 小潮情况 ADCP 后向散射声强与海水浊度数据具有较高相关性, 而中、大潮期间 ADCP 后向散射声强与海水浊度变化的相关性逐渐变差。由于声学探测悬沙浓度的缺点是回声测量会受粒径变化的影响, 因而, 对于大潮情况, 近海区域的悬沙浓度及成分容易在潮汐涨退和海流的影响下发生变化, 悬浮物粒径发生混杂^[3], 利用 ADCP 后向散射声强反演悬沙浓度时有必要进行粒径修正, 提高反演结果的可靠性。另外, 由于测量水体差异, 浊度与悬沙浓度之间的线性关系也是离散的, 通过适量的水样采集进行定标, 能够获得更为准确的悬沙浓度。作者的研究只针对于近海水域进行, 对于深海区域的研究有待于下一步进行。

参考文献:

- [1] 魏晓, 汪亚平, 杨旻, 等. 浅海悬沙浓度观测方法的对比研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 161-170.
Wei Xiao, Wang Yaping, Yang Yang, et al. Suspended sediment concentrations in shallow sea: comparative study of methods[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(1): 161-170.
- [2] 兰志刚, 龚德俊, 于新生, 等. 现场粒径分析仪与 ADCP 同步测量悬浮沉积物浓度的粒径修正方法[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35 (5): 385-392.
Lan Zhigang, Gong Dejun, Yu Xinsheng, et al. Particle size correction of suspended sediment concentration measured by ADCP with In-situ particle size analyzer[J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 2004, 35 (5): 385-392.
- [3] 原野, 赵亮, 魏皓, 等. 利用 ADCP 和 LISST 100 仪观测悬浮物浓度的研究[J]. 海洋学报, 2008, 30(3): 48-55.
Yuan Ye, Zhao Liang, Wei Hao, et al. Research on observing suspended sediment concentration using ADCP and LISST-100 instruments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(3):48-55.
- [4] Wang Y P, Gao S. ADCP measurements of suspended sediment flux at the entrance to Jiaozhou Bay, western Yellow Sea[J]. Acta Oceanol Sin, 2013, 32(12): 96-103.
- [5] Guerrero M. The investigation of sediment processes in rivers by means of the acoustic doppler profiler[D]. Bologna, Italy: Proceedings of ICWRS, 2014: 368-373.
- [6] Gippel C J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams[J]. Hydrological Processes, 1995, 9(1): 83-97.
- [7] Grayson R B, Finlayson B L, Gippel C J, et al. The potential of field turbidity measurements for the computation of total phosphorus and suspended solids loads[J]. Journal of Environmental Management, 1996, 47(1): 257-267.
- [8] Pavanelli D, Bigi A. Indirect methods to estimate suspended sediment concentration: reliability and relationship of turbidity and settleable solids[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90 (1): 75-83.
- [9] Chanson H, Takeuchi M, Trevethan M. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 1406 -1416.
- [10] 程鹏, 高抒. ADCP 测量悬沙浓度的可行性分析与现场标定[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(2): 168-175.
Cheng Peng, Gao Shu. Suspended sediment concentration measurements with ADCP: Feasibility analysis and in situ calibration[J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 2001, 32(2): 168-175.
- [11] 兰志刚, 龚德俊, 李思忍, 等. ADCP 对悬浮沉积物浓度的测量及其误差分析研究[J]. 海洋科学, 2004, 28(10): 20-23.
Lan Zhigang, Gong Dejun, Li Siren, et al. Acoustic measurement of suspended sediments with ADCP and its error analysis[J]. Marine Sciences, 2004, 28(10): 20-23.
- [12] Moore S A, Coz J L, Hurther D, et al. On the application of horizontal ADCPs to suspended sediment transport surveys in rivers[J]. Continental Shelf Research, 2013, 46(1): 50-63.
- [13] Downing A, Thorne P D, Vincent C E. Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer[J]. J Acoust Soc Am, 1995, 97(3): 1614-1620.
- [14] Deines K L. Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers[C]//Current measurements, proceedings of the IEEE sixth working conference. San Diego, USA: IEEE Press, 1999: 249- 253.
- [15] Medwin H, Clay C S. Fundamentals of Acoustical Oceanography[M]. San Diego, USA: Academic Press, 1998.
- [16] Ha H K, Maa J P Y, Park K, et al. Estimation of high-resolution sediment concentration profiles in bottom boundary layer using pulse-coherent acoustic Doppler current profilers[J]. Marine Geology, 2011, 279 (1-4): 199-209.
- [17] 张文祥. ADP 和 OBS 观测支持下的长江口悬沙动力过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006: 33-36.
Zhang Wenxiang. A study of Suspended sediment dynamic processes based on observation using ADP and OBS in the Changjiang estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2006:33-36.

Reliability analysis of suspended sediment concentration estimated using an ADCP and a turbidity meter

LI Xiao-long¹, CHEN Yong-hua¹, JIANG Jing-bo¹, NI Zuo-tao¹, LIU Qing-kui²,
XU Yong-ping¹, TU Deng-zhi¹, LI Si-ren¹

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China: 2. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Received: Feb. 17, 2015

Key words: ADCP; turbidity; suspended sediment concentration; acoustic backscatter

Abstract: Turbidity and suspended sediment concentration (SSC) exhibit a good linear relationship, while the relationship between the intensity of acoustic backscatter (ABS) and SSC shows a monotonic increase. In this paper, at an offshore continuous observation fixed-point, an acoustic Doppler current profiler (ADCP) was used to estimate the SSC. Turbidity and ADCP echo intensity values were collected during a tidal cycle over half a month and analyzed by correlation. The reliability of an SSC inversion model using acoustic backscatter intensity was discussed for neap and spring tides. The SSC inversion process took into account the impact of nonspherical spreading in the near field of the acoustic transducer as well as background noise. Here the analysis of the data from these field experiments showed that during the spring tide, the concentration and composition of the suspended sediments were affected by tidal ranges and currents. In other words, the particle size of the suspended sediment changed dramatically during the spring tide, which impacted the SSC and ABS correlation. However, during the neap tide, the particle size distribution of the suspended sediment remained stable. Therefore, SSC can be determined using ADCP acoustic backscatter.

(本文编辑: 谭雪静)