

# 用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究\*

汪亚平 高 抒 李坤业

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

**提要** 用 DR300 型宽幅 ADCP 在胶洲湾口门进行了走航式断面观测。观测期间悬沙浓度小于  $40\text{mg/L}$ ，悬沙粒度分布曲线具有双峰特征，调查船航速为  $2\text{—}3\text{m/s}$ 。用水样过滤法率定相应的 ADCP 声学信号，获得了计算悬沙浓度的半经验公式及悬沙浓度剖面分布数据。分析结果表明，即使在悬沙浓度较低、悬沙分选性较差、船速较高等不利于 ADCP 观测的现场条件下，测量误差仍与光透式浊度计的误差相当。因此，在走航状态和低悬沙浓度条件下，用宽幅 ADCP 测定悬沙浓度是可行的；这一方法在浅海区域的应用可以使悬沙浓度测量效率得到大幅度提高。

**关键词** ADCP 悬沙浓度 回声强度 胶洲湾

**学科分类号** P736.21

研究海湾和近岸水体的悬沙及其通量，对海岸环境演化的认识及港口、土地资源的开发与持续利用有重要意义。目前，已经根据光学和声学原理研制了多种浊度计，用于测量海水的悬沙浓度 (Proni *et al.*, 1975; Hay *et al.*, 1992; Lynch *et al.*, 1997)。与光学浊度计相比，声学浊度计观测效率更高，因为前者只能测量探头所在处的浓度，而后者可以同步获得悬沙浓度的剖面数据。近年来得到快速发展的声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 是为测定流速而设计的，但在 ADCP 的输出数据中含有声学的浊度信息，因此 ADCP 具有测定悬沙浓度的潜力。例如，Thevenot 等 (1993) 用  $2.4\text{MHz}$  宽幅 ADCP 与光透式浊度计 (Transmissometer) 在美国 Chesapeake 河口定点监测泥沙疏浚时的悬沙浓度，其结果表明两者具有相似的精度，而在浓度较高情况下 (如  $>50\text{mg/L}$ )，ADCP 的测量精度高于光透式浊度计。为了研究在走航状态和低悬沙浓度条件下用宽幅 ADCP 测定悬沙浓度的可行性，在胶洲湾口门进行了试验。所用仪器为 DR300 型宽幅 ADCP (美国 RDI 公司产品)。本文对这次试验结果进行分析，并讨论数据分析的方法和应用前景。

## 1 研究区概况

胶洲湾位于山东半岛南岸 (图 1)，水深大于海图  $0\text{m}$  的面积为  $256\text{km}^2$ ，湾口最窄处为

\* 中国科学院院长基金“百人计划”海洋沉积动力学 (A10970203 号) 和国家杰出青年科学基金 (49725612 号) 资助。汪亚平，男，出生于 1972 年 4 月，博士生，Fax: 0086-0532-2870882

收稿日期: 1998-11-03, 收修改稿日期: 1999-05-15

3.1km,最大水深 64m;潮汐属正规半日潮类型,大潮潮差约为 4.6m,平均潮差为 2.8m(李善为,1983;中国海湾志编委会,1993)。湾口表层最大流速超过 1.5m/s。由于胶洲湾地区属于基岩港湾海岸,细颗粒沉积物供应量较小,因此湾内沉积速率较低,约为 0.07—0.14cm/a,且湾口水体的悬沙浓度较低(国家海洋局一所,1984)。

## 2 方法

### 2.1 海上观测

在胶洲湾口门处布设两条断面(图 1),于 1997 年 9 月 19 日用 RDI 公

司生产的宽幅 ADCP(包括 TRANSECT 软件系统),进行了 10h 走航式测量。ADCP 的工作频率为 300kHz,最大探测深度为 120m,水层单元分辨率设置为 1m(沿水深每 1m 视为一个水层单元),数据采集周期为 10s,回声强度的测量范围设置在 200dB 内,在每小时内将两条断面各测量一次。ADCP 固定在调查船前部船舷右侧水下,其探头距水面 2m(图 2)。船舶定位使用 GPS 系统,航速 2—3m/s。

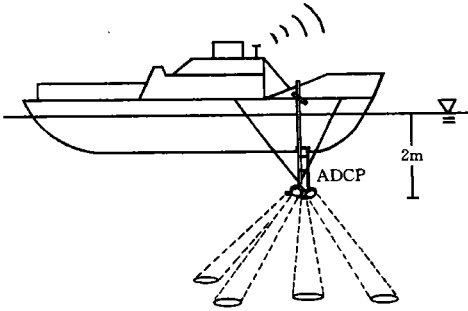


图2 用宽幅 ADCP 进行走航式测量装置示意图

Fig.2 Schematic diagram showing the mounting of the DR300 Broad Band ADCP for the measurements

测定沿水深各水层单元的三维(垂向、东/西、南/北)流速,并测定各水层单元悬沙反散射的强度,即回声强度(Echo Intensity)。回声强度的大小能够间接反映水中悬沙浓度的多少(Gordon, 1996)。实验表明,回声强度的大小直接取决于声束在水中的传播、吸收、散射及 ADCP 的发射功率,可表示为(Thevenot *et al*, 1993; Gordon, 1996):

$$E'_i = \frac{1}{\beta}(S_L + S_v) - 201g(D) - 2aD \quad (1)$$

式中  $E'_i$  是 ADCP 探头接收的回声强度(dB); $\beta$ 是与悬沙粒径有关的参数; $S_L$ 是与发射功率有关的参数; $S_v$ 是水团单位体积的反散射强度; $D$ 是探头至水层单元的距离(m); $a$ 是声波吸收系数(dB/m)。对于此次测量, $D = (H - 2)$ m, $H$ 是水深;发射功率为 80W(Gordon, 1996)。

水团单位体积的反散射强度与悬沙浓度之间的关系可表示为(Urick, 1983; Dammann *et al*, 1991; Thevenot *et al*, 1993):

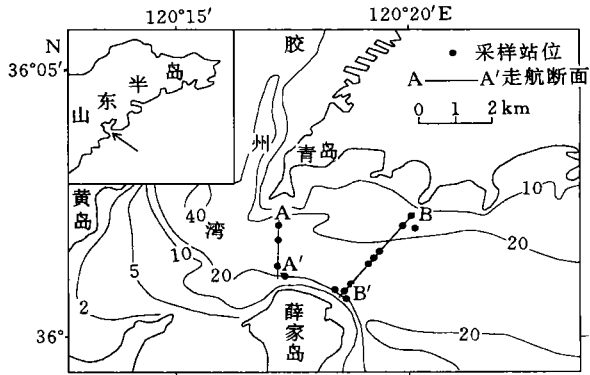


图1 研究区位置(等深线单位:m;据1985年海图)

Fig.1 The location of the study area (bathymetry in metres, on the basis of 1985 Chart)

### 2.2 悬沙浓度与回声强度关系的建立

宽幅 ADCP 不断发射声波脉冲,脉冲被水中悬浮物质(悬沙)散射返回并被 ADCP 的 4 个探头接收,根据多普勒效应,可以同时

$$S_v = 101g(\sum_i n_i \sigma_i) + 101g(C) - 101g(C_0) \quad (2)$$

式中  $n_i$  是第  $i$  级悬沙的数量,  $\sigma_i$  是第  $i$  级悬沙的反散射横断面面积,  $C$  是悬沙浓度 (mg/L),  $C_0$  是与环境特征有关的常数。在某一特定区域中, 假设悬沙具有一定的粒级组成且沉积物来源稳定,  $n_i$  和  $\sigma_i$  可看作常数。将 (1)、(2) 式合并, 有:

$$\lg(C) = K + 0.1\beta E_i \quad (3)$$

(3) 式中系数  $K$  及  $\beta$  可通过现场测量来校定 (见下文)。

$$K = \lg\left(\frac{C_0}{\sum_i n_i \sigma_i}\right) - 0.1S_L \quad (4)$$

(4)  $E_i$  是 ADCP 软件输出的经水深校正的回声强度:

$$E_i = E'_i + 20\lg(D) + 2aD \quad (5)$$

### 2.3 水样分析

与 ADCP 测量同步取得表层水样 14 个 (站位见图 1), 并用过滤法测定悬沙浓度, 使 1L 左右的水样通过 0.45 $\mu$ m 规格已称重的滤膜 (国家海洋局第二海洋研究所生产), 再将附着沉积物的滤膜置于烘箱中, 在 60 $^{\circ}$ C 下烘干, 称重。考虑到在过滤过程中滤膜因溶解可能损失部分重量, 采用对此种滤膜的双膜校正公式 (Gao *et al.*, 1996):

$$W_2 = 1.003W_1 - 2.171 \quad (6)$$

式中  $W_2$ 、 $W_1$  分别是过滤后及过滤前的滤膜质量 (mg)。因此, 悬沙浓度  $C$  为 (Gao *et al.*, 1996):

$$C = \frac{W_3 - W_2}{V} \quad (7)$$

式中,  $W_3$  是水样过滤后有沉积物附着的滤膜质量 (mg),  $W_2$  可由 (6) 式计算得到,  $V$  是过滤的水样体积 (L)。

由于取得的水样中悬沙的量较少, 将含量较多的 4 个水样合并在一起, 用 Cilas 940L 型激光粒度仪 (法国 Cilas 激光工业公司产品, 测量范围为 0.3—2 000 $\mu$ m) 进行了粒度分析, 以取得悬沙的粒径分布范围。

## 3 结果

### 3.1 悬沙浓度计算公式中系数的确定

ADCP 在测量时需要置于水面以下一定深度, 因此在水表面附近形成一个盲区。本次测量的范围包括探头以下 2.1m 处至接近海底的水层单元范围。

胶洲湾口门的悬沙粒度分析表明, 其粒径小于 19 $\mu$ m, 变化范围很小, 即式 (3) 中的  $\beta$  可视为常数, 故本海区回声强度的测量是稳定的。野外调查证实, 胶洲湾水体的透明度夏季可达 6m 左右 (中国海湾志编委会, 1993)。此外, 本次测量处于大潮期间, 水体垂向混合作用较强, 因此将探头以下第一个水层单元处测得的回声强度近似看作水面表层的数据, 使其对应于表层水样的悬沙浓度。

考虑到每 10s 测得的回声强度可能存在的波动, 将其进行 30s 的算术平均处理。取 1997 年 9 月 19 日 ADCP 在胶洲湾口门处测得的 30s 平均的和 10s 的回声强度值, 分别对 4

个探头的回声强度再作算术平均,然后与对应时刻同一站位取得的表层水样由过滤法测得的悬沙浓度进行回归分析(图 3),得到的方程为:

$$\lg(C) = -4.04 + 0.066E_r \quad (R = 0.88, n = 14) \quad (8)$$

$$\lg(C) = -3.69 + 0.061E_r \quad (R = 0.87, n = 14) \quad (9)$$

对应于 0.01 显著水平的相关系数检验临界值为 0.62,较方程(8)、(9)的相关系数小得多,表明悬沙浓度与回声强度有密切相关关系。从图 3 可看出,在所考虑的悬沙浓度范围内,两条曲线非常接近。方程(8)在一定程度上消除了回声强度波动的影响,相关系数略高。用方程(8)或(9)作为将 ADCP 回声强度数据转换为悬沙浓度的校正方程,可得到悬沙浓度剖面。

用(8)、(9)两式计算的悬沙浓度的平均相对误差可用下式得出:

$$E_r = \frac{100}{n} \sum_i \frac{|C_c - C_m|}{C_m} \quad (10)$$

式中  $E_r$  是平均相对误差(%),  $C_c$ 、 $C_m$  分别是计算的和实测的悬沙浓度(mg/L),  $n$  是数据个数。根据(10)式并以水样过滤法测定的悬沙浓度为基准,用(8)、(9)两式计算的悬沙浓度值的相对误差均为 32%,与光透式浊度计(Transmissometer)的误差大致相当。张叔英等(1998)和郭纪捷等(1998)用自制的 ASSM 系统观测悬沙浓度剖面,选择不同的标定方法

其测量误差为 20%—50%。可见,用宽幅 ADCP 测量悬沙浓度能够达到专用悬沙测量仪器的精度。

将水样悬沙粒度分析的结果作出频率直方图(图 4), 粒级  $> 5.7\phi$ , 而且  $> 8.1\phi$  的占 64.8%, 中值粒径为  $9.07\phi$ , 属于粉砂质粘土; 而湾口底质中基本不含有此种类型的沉积物(中国海湾志编委会, 1993)。这表明湾口水体中的悬沙不是湾口底质再悬浮物质, 而是涨、落潮流的平流作用带来的。悬沙粒度频率直方图呈双峰型, 并缺失两个峰之间的粒级 7.5— $8.1\phi$  部分, 指示两个来源的沉积物。

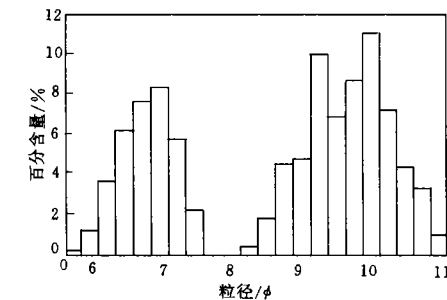


图4 悬沙粒度分布

Fig.4 Grain size histogram for the suspended sediment

物。悬沙的这种粒度特征,也会增加 ADCP 的相对误差。如果悬沙具有更窄的粒径范围,则 ADCP 观测的准确度可望得到进一步提高。此外,虽然测量中船速最大达到 3m/s,但回声强度的测量数据较为稳定,表明宽幅 ADCP 走航式测量在较大的航速下仍是可行的。

### 3.2 悬沙浓度剖面

现将 ADCP1997 年 9 月 19 日 12:29—12:42 沿断面 A—A'(36°02.44' N, 120°17.10' E

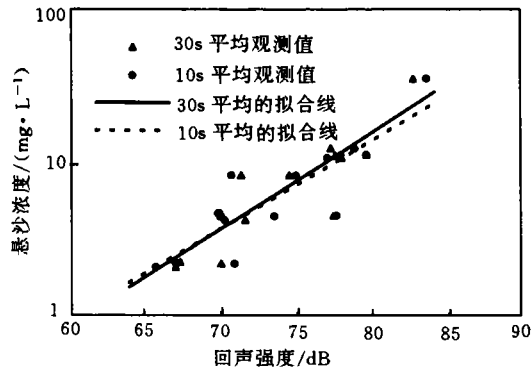


图3 悬沙浓度与回声强度的关系

Fig.3 Relationships between the echo intensity and the suspended sediment concentration

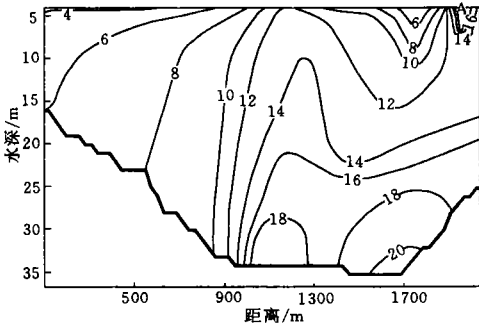


图5 悬沙浓度(mg/L)的断面分布

Fig.5 Distribution pattern of the suspended sediment concentration (mg/L) over the cross-section

面的悬沙浓度分布状况(图5)。从图5可看出,南部水体的悬沙浓度大于北部,海湾底部的浓度大于水体上部。在靠北岸的100—750m范围内,从水表层到水底的悬沙浓度较低,均 $< 10\text{mg/L}$ 。在水道南侧1900—2000m处的表层(图5中“A”处)形成一个高浓度区( $> 20\text{mg/L}$ ),最大值超过 $30\text{mg/L}$ 。野外调查在海水表面曾观察到浑浊水团,图5中的高浓度峰值区反映出的可能是这些浑浊水团。此外,在水道南侧的海底悬沙浓度达 $20\text{mg/L}$ ,形成此断面的次高浓度区。值得注意的是,在900m处,似乎形成一个略向北倾斜的悬沙浓度锋面,在锋面两侧悬沙浓度有较大差异,南侧水体的悬沙浓度较北侧的高近1倍。

#### 4 结论

4.1 用DR300型宽幅ADCP在胶洲湾口门进行了走航式断面观测,并同步采水样。用水样过滤法定率相应的ADCP声学信号,获得了计算悬沙浓度的半经验公式及悬沙浓度剖面。

4.2 计算的悬沙浓度的相对误差为32%,与目前通用的悬沙浓度测量仪器的误差相当。说明即使在悬沙浓度较低、悬沙分选性较差、船速较高的条件下,仍可用宽幅ADCP进行走航式悬沙浓度的测量。

致谢 官晨钟、程鹏、薛允传协助参加了野外测量,中国科学院海洋研究所“科交二号”的全体船员提供了此次海上观测的后勤支持,谨致谢忱。

#### 参 考 文 献

- 中国海湾志编辑委员会,1993. 中国海湾志(第四分册). 山东半岛南部和江苏省海湾. 北京:海洋出版社,157—258
- 李善为,1983. 从海湾沉积物特征看胶洲湾的形成演变. 海洋学报,5(3):328—339
- 张叔英,李允武,1998. 声学悬浮泥沙观测系统的研制和应用. 海洋学报,20(5):114—119
- 国家海洋局第一海洋研究所,1984. 胶洲湾自然环境. 北京:海洋出版社,171—268
- 郭纪捷,任来法,李允武,1998. 声学悬浮泥沙观测数据现场定标研究. 海洋学报,20(5):120—125
- Dammann W P, Proni J R, Craynock J R *et al*, 1991. Oceanic waste-water outfall plume characteristics measured acoustically. *Chemistry and Ecology*, 5:75—84
- Gao Shu, Park Yong Ahn, Zhao Yiyang *et al*, 1996. Transport and resuspension of finegrained sediments

— $36^{\circ}01.32'N$ ,  $120^{\circ}17.10'E$ )测量获得的准同步数据进行分析,来说明悬沙浓度校正方程的应用。走航A—A'断面历时约12min(直线距离约2500m)。考虑到行船安全,在断面两侧靠岸的浅水区域未取得测量数据。ADCP的4个探头每10s各测得从水深4.1m至近海底每个水层单元的回声强度,并输出反散射物质回声强度断面分布。为得到定量的悬沙浓度剖面,对4个探头在各水层单元获得的回声强度数据进行算术平均,用方程(9)作悬沙浓度校正,获得A—A'断面的悬沙浓度校正剖面。

over the southeastern Yellow Sea. Proceedings of the Korea-China International Seminar on Holocene and later Pleistocene Environments in the Yellow Sea Basin. In: Chang-Bok Lee, Zhao Yi-yang eds. Seoul, Korea, 83—98

Gordon R L, 1996. Acoustic Doppler Currents Profilers principles of operation: a practical primer (second edition for Broad Band ADCPs). RD Instruments, USA, 29—32

Hay A E, Sheng J, 1992. Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter. *J Geophys Res*, 97(C10):15 661—15 677

Lynch J F, Gross T F, Sherwood C R *et al*, 1997. Acoustical and optical backscatter measurement sediment transport in the STRESS experiment. *Continental Shelf Research*, 17(4):337—366

Proni J R, Rona D C, Lauter C A *et al*, 1975. Acoustic observations of suspended particulate mater in the ocean. *Nature*, 254:413—515

Thevenot M M, Kraus N C, 1993. Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary. *J Marine Envir Engin*, 1:65—79

Urick R J, 1983. Principles of underwater sound. McGraw-Hill Book Company. New York, 1—95

## A PRELIMINARY STUDY ON SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION MEASUREMENTS USING AN ADCP MOUNTED ON A MOVING VESSEL

WANG Ya-ping, GAO Shu, LI Kun-ye

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

**Abstract** A DR300 Broad Band ADCP mounted on a moving vessel (with a speed of 2—3m / s) was used to measure the profile of suspended sediment concentrations. The measurements were undertaken at the entrance to Jiaozhou Bay, Shandong Peninsula (where the water is associated with a low suspended sediment concentration) during a spring tide. The echo intensity data produced by the ADCP have been transformed into suspended sediment concentration data on the basis of *in situ* calibration. The results show that the calibrated curve can be used to calculate the suspended sediment concentration, with a relative error of around 32%. Hence, it is feasible to measure the suspended sediment concentration using the ADCP mounted on a moving vessel with a relative high speed. Further, this technique can be applied to the measurement of low suspended sediment concentrations. Compared with transmissometers and conventional acoustic backscatters, the ADCP represents a potentially powerful tool to obtain suspended sediment concentration data with a high efficiency in continental shelf waters.

**Key words** ADCP Suspended sediment concentration Echo intensity Jiaozhou Bay

**Subject classification number** P736.21