

ADCP 测量悬沙浓度的可行性 分析与现场标定*

程 鹏 高 抒

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 根据现场观测数据,对 ADCP 测量悬沙浓度的进行标定实验。结果表明,在观测期间悬沙粒径变化较小的条件下,后散射强度与水样悬沙浓度之间存在较好的相关性。悬沙浓度剖面标定公式中的参数 C' 可用剖面实测水样浓度来确定,该参数与深度密切相关:同一剖面不同深度之间有一定的波动,但同一深度不同潮时的变化很小。使用同一剖面参数 C' 的平均值计算出的剖面悬沙分布误差较大(29%—43%),而按不同深度段分别标定,误差可以小于 20%,能够满足沉积动力学研究的需要。

关键词 ADCP, 悬沙浓度, 现场标定

中图分类号 P736.21

悬移质输运是海洋沉积动力学研究的一个重要方面,其中悬沙浓度的观测是一个关键问题。传统的现场过滤水样获得悬沙浓度的方法,费时费力,而且只能得到零散的数据。依据光学原理的浊度计也只能测量探头所在位置的悬沙浓度。相比而言,声学遥测的方法不需要采样,不干扰水体,具有高空间分辨率(分辨率为 10^2 — 10^3 mm,依不同声波频率而变化),可以实时、连续观测,获得悬沙浓度剖面的时间序列,在沉积动力学研究中,具有更广阔的应用前景。目前,声学后散射悬沙测量仪(ABS)已经得到了广泛的应用(Hanes *et al.*, 1988; Libicki *et al.*, 1989; Lynch *et al.*, 1991; Thorne *et al.*, 1993; Crawford *et al.*, 1993; Shi *et al.*, 1997)。

自 20 世纪 80 年代以来,ADCP(声学多普勒流速剖面仪)已成为物理海洋学研究的常规仪器(Woodward *et al.*, 1986)。ADCP 发射固定频率的声波,接收水中散射体的后散射信号,根据多普勒效应,计算水体的流速。ADCP 利用的散射体主要是水体中的浮游生物和悬浮沉积物,这使得 ADCP 具备了获取悬浮体信息的功能。近年来,ADCP 已被广泛用于测量浮游生物量和研究浮游生物的分布和行为(如摄食活动等)(Flagg *et al.*, 1989a,b; Heywood *et al.*, 1991; Roe *et al.*, 1993; Zhou *et al.*, 1994; Batchelder *et al.*, 1995; Griffiths *et al.*, 1996; Heywood, 1996)。Land 等(1997)用 ADCP 测量悬沙浓度,取得了良好的效果。Holdaway 等(1999)比较了 ADCP 与光学透射式浊度计的测量结果,认为 ADCP 已具备直接测量悬沙浓度的潜力。汪亚平等(1999)用 ADCP 在胶州湾进行走航式悬沙浓度

* 中国科学院重点资助项目, KZ952-J1-406 号、国家自然科学基金重点资助项目, 49876018 号和中国科学院重大资助项目, A04980239 号。程 鹏, 男, 出生于 1973 年 5 月, 博士, E-mail: Shugao@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2000-01-25, 收修改稿日期: 2000-10-30

测量的研究,结果表明在走航状态下用 ADCP 测定悬沙浓度是可行的。但是,用来设计测量流速的 ADCP 毕竟不同于用于专门设计声学后散射泥沙观测系统,它测量悬沙浓度的能力和问题仍需要进一步的研究。本文的研究目的在于分析 ADCP 测量悬沙浓度的可行性,并根据现场观测的数据探讨影响其测量精度的因素。

1 材料与方法

1.1 水样采集与处理

1999 年 9 月使用 RDI 公司生产的 RD300 型宽带 ADCP 在渤海辽东浅滩两个站位(图 1)进行了定点观测。观测中,ADCP 悬挂在船舷一侧,探头位于水面以下 1.8m,工作频率为 307.2kHz。在 ADCP 观测的同时,在现场水深 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 倍深度分别采集水样,两个站位共定点观测 18h,取水样 5 次,共 25 个水样。其中在 T1 站分别于低平潮和落急时采样,在 T2 站于涨急、高平和落急时分别采样。所取的水样在现场用 0.45μm 滤膜过滤,烘干滤膜,用称重法测得悬沙浓度。称重后的滤膜用蒸馏水浸泡,将悬沙冲洗下来,用 Cilas 940L 激光粒度仪(测量范围 0.3—2000μm)进行粒度分析,取得悬沙的粒径分布。

1.2 ADCP 测量悬沙浓度的理论基础

ADCP 测量悬沙浓度依据于声学后散射原理。平均体积后散射强度(S_v , Mean Volume Backscattering Strength)定义为单位水体内散射体的总的后散射截面(Back-scattering Cross-Section)(Roe *et al*, 1996; Iida *et al*, 1996),即:

$$S_v = 10\lg \sigma_{bs} \tag{1}$$

式中, σ_{bs} 为总后散射截面,可以写成平均后散射截面与散射颗粒数量 N 的乘积:

$$\sigma_{bs} = N \sigma_{bs} \tag{2}$$

式中, N 为单位体积中的颗粒数量,可以理解为颗粒的数量浓度。同时, N 可以写成质量浓度,也就是悬沙浓度 C 的函数:

$$N = \frac{C}{\rho_g \frac{4}{3}\pi a^3} \tag{3}$$

式中, ρ 为颗粒的平均密度, a 为平均粒径, g 为重力加速度。从公式(3)可以看出后散射强度依赖于颗粒的粒径和物理性质(密度)。假定某一现场观测期间悬沙的粒径和密度没有太大的变化,并令 $K = 10\lg \frac{\sigma_{bs}}{\rho_g \frac{4}{3}\pi a^3}$

$$10\lg \frac{\sigma_{bs}}{\rho_g \frac{4}{3}\pi a^3} \tag{4}$$

则公式(1)可以简化为: $S_v = K + 10\lg C \tag{5}$

K 为常数,方程(5)表明后散射强度与悬沙浓度之间满足指数关系。

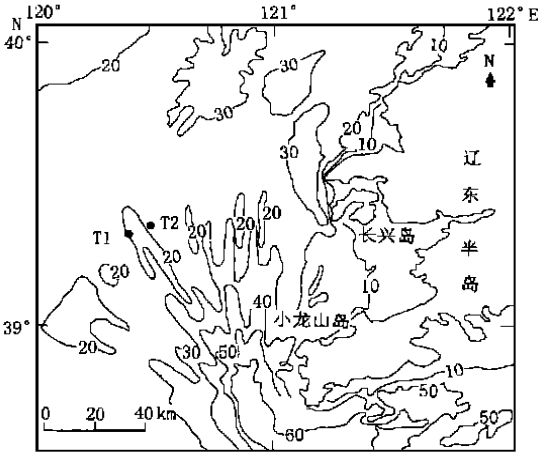


图 1 ADCP 定点观测站位
Fig. 1 Statins for ADCP deployment

1.3 平均体积后散射强度 S_v 的计算

ADCP 不能直接测量平均体积后散射强度 (S_v), 它记录的是回声强度 E , 回声强度可表达为 (Gordon, 1996): $E = SL + S_v + C_0 - 20\lg R - 2aR$ (6) 式中, SL 为声源强度; a 为水体的吸收系数; R 为探头沿探测方向到水层的距离 (等于 $D/\cos\beta$, D 为水面到探测水层的垂直距离, β 为探头测量方向与 ADCP 柱体中轴线的夹角, 本文所用 ADCP 为 20 度); 常数 C_0 表明 E 只是相对测量, 而不是绝对测量。早期的 ADCP 不能确定声源强度, 因此实践中需要改动硬件才能得出相对后散射强度 (Flagg *et al.*, 1989a、b)。现在, RDI 公司对每台 ADCP 的特定参数进行了测试, 使得 ADCP 计算绝对后散射强度成为可能。Deines (1999) 详细地叙述了用 ADCP 数据 (E) 计算平均体积后散射强度的方法和操作过程, 提出平均体积后散射强度可以表达为:

$$S_v = C_1 + 10\lg[(Tx + 273.16)R^2] - L - P + 2aR + Kc(E - E_r) \quad (7)$$

式中, C_1 为与 ADCP 性能有关的常数, T_x 为探头记录的水温, L 为 $10\lg$ (ADCP 发射脉冲长度, 单位为 m), P 为 $10\lg$ (ADCP 输出功率, 单位为 W), Kc 为系数 (可由厂家或用户测定), E 为 ADCP 记录的回声强度, E_r 为实时的噪声本底, R 和 a 的定义同方程式 (5)。宽带 307.2 kHz ADCP 的 C_1 和 P 值可见 Denies (1999)。本文所用 ADCP 的 4 个探头的 Kc 值由 RDI 公司提供 (通信获得)。发射脉冲长度为设定值, 与 ADCP 水层单元厚度相等 (本文中为 1m)。噪声本底为水体中没有散射颗粒时的信号值, 可在实验室测定, 但在现场观测时, 影响噪声本底的因素很多, 如船速、风速等 (Heywood *et al.*, 1991)。因此, ADCP 的噪声本底需要根据现场观测数据确定, 在每一实测剖面中, 其位置恰好在噪声减去信号的值与噪声的比为 1 的水层, 该水层的回声强度可作为噪声本底 (Heywood, 1996)。

1.4 悬沙剖面的现场标定

根据方程 (5), C 可表达为:

$$10\lg C = S_v + K \quad (8)$$

将方程 (7) 与 (8) 联立可得 C 的计算公式:

$$10\lg C = C_1 - K + 10\lg(Tx + 273.16) + 20\lg R - L - P + 2aR + Kc(E - E_r) \quad (9)$$

方程 (9) 中只有 $C_1 - K$ 为未知常数, 可以通过实测水样的悬沙浓度求出。如果某一实测的水样的 C 及其它相应的各参数以 0 为下标表示, 则:

$$10\lg C_0 = C_1 - K + 10\lg(Tx_0 + 273.16) + 20\lg R_0 - L - P + 2aR_0 + Kc(E_0 - E_r) \quad (10)$$

合并方程 (9)、(10) 可得出悬沙剖面中任一深度 C 的表达式:

$$10\lg C = C' + 10\lg(Tx + 273.16) + 20\lg R + 2aR + KcE \quad (11)$$

$$\text{式中} \quad C' = 10\lg[C_0/(Tx_0 + 273.16)] - 20\lg R_0 - 2aR_0 - KcE_0 \quad (12)$$

方程 (11) 消除了 L 、 P 、 C_1 、 E_r 等参数, 使得悬沙浓度的计算不依赖于 ADCP 的自身性能参数。同时, 方程 (11) 中只有一个未知参数 C' , 因而只需一个实测悬沙浓度值即可确定整个悬沙剖面的分布。此外, 式中 T_x (探头记录的温度) 是随时间变化的, 故方程 (11) 可以用来计算悬沙剖面的时间序列。当然, 方程 (11) 源于方程 (5), 而方程 (5) 依据于简化的假设条件, 因此, 方程 (11) 的实用性和影响因素还需要通过现场标定来验证和分析。

2 结果

2.1 水样悬沙浓度与平均体积后散射强度的相关分析

根据前述方法, 计算了水样悬沙浓度和与水样采集时刻相同、深度相等的水层的后散射强度。除去个别误差明显过大的数据, 对两个测站分别进行了水样悬沙浓度与平均体积后散强度的指数相关分析。由于 ADCP 的 4 个探头记录的回声强度值不尽相同, 将 4 个探头分别计算的 S_v 及平均值与水样悬沙浓度进行相关分析。结果表明(表1、图2), S_v 与水样悬沙浓度之间有良好的相关系数, 4 个探头及平均值作出的相关性相差不多, 但相关性最好的并不是使用平均值进行的回归分析结果, 而是在不同站位, 相关性最好的探头不同, 其中在 T1 站, 4 号探头的相关性最好, 为 0.94; 在 T2 测站, 1 号探头的相关系数最高, 为 0.8。这表明不同探头的测量结果与仪器自身性能无关, 而取决于仪器的现场安置和现场环境。在分析 ADCP 数据时, 应同时分析 4 个探头的结果, 以选取质量最好的数据。在 T1 站观测期间, 天气和海况较好; 而在 T2 站, 风浪很大, 波高达 2—3m, 致使观测被迫中断。恶劣的天气海况影响了 ADCP 数据的质量, 这可能是造成 T2 测站相关系数低于 T1 测站的原因。两个测站用回归方程计算悬沙浓度的平均相对误差可用下式求出:

$$\Delta = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_c - C_m}{C_m} \right|$$

(13)

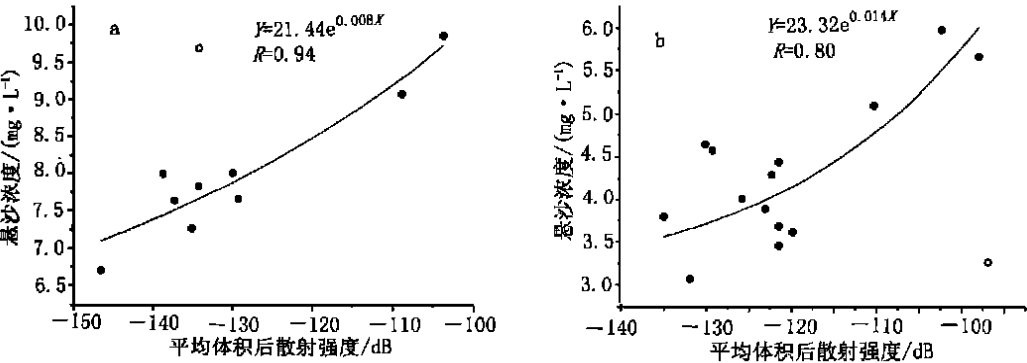


图2 水样悬沙浓度和 ADCP 平均体积后散射强度之间的相关分析(a 为 T1 站分析结果; b 为 T2 站分析结果; 图中实心点为相关分析点, 空心点为弃去点)

Fig. 2 Relationships between suspended sediment concentrations by water sample filtering and mean volume back-scattering strength, on the basis of regression analysis, for: a Station T1; b Station T2; the solid dots are used for the analysis, and the outliers expressed by the circles are not included

式中, Δ 为平均相对误差(%), C_c 、 C_m 分别是计算和实测的悬沙浓度(mg/L), n 是数据个数。在 T1 站用回归方程求出的相对误差为 4. 3%, T2 站为 10. 9%。总的来说, 两个测站的平均相对误差都较小。这表明在方程(4) 的简化条件下, ADCP 具备测量悬沙浓度的适用性和较好的精确度。

从图 2 还可以看出, 在不同站位, 相同的平均后散射强度对应的悬沙浓度是不同的, 也就是说, 后散射强度只能相对反映悬沙浓度。在不同站位之间, 不能通过比较后散射强度以比较悬沙浓度的大小, 而要分别做水样校正。造成这个现象可有很多原因, 但最有可能的是由于仪器自身的测试系统。如同天平调零一样, 在不同的调零状态下, 测试同一样品可能有差异(当然这个差异很小)。从一个站位到另一站位, ADCP 经过了启动、关闭、再启动的过程, 因而在不同的站位, ADCP 处于不同的测试状态。因此, 相同的后散射强度对应的悬沙浓度大小不同。如果在不同的站位, ADCP 保持在同一测试状态下(即移动站位时不关闭 ADCP), 有可能不同站位的后散射强度具有可比性。当然, 这一看法还只是推测, 尚待现场验证。

2.2 悬沙浓度剖面的现场标定

2.2.1 瞬时剖面标定 根据方程(11), 用同步采集的水样测得的悬沙浓度值求出剖面各采样深度的标定参数 c' , 然后计算出其平均值 $\overline{c'}$, 再由 $\overline{c'}$ 反演各采样深度的悬沙浓度, 并由方程(13) 计算相对误差, 结果见表 2。

表 2 不同潮时悬沙剖面的平均标定参数 $\overline{c'}$ 和平均相对误差

Tab. 2 Profile mean of the parameter $\overline{c'}$ for the various tidal phases and associated mean relative errors				
站位	潮时	$\overline{c'}$	平均相对误差(%)	样本数
T 1	低平	- 72. 75	36. 95	5
T 1	落急	- 73. 88	29. 34	5
T 2	涨急	- 79. 69	43. 01	5
T 2	高平	- 80. 14	38. 05	5
T 2	落急	- 81. 34	35. 35	5

不同潮时各剖面的悬沙浓度的平均相对误差约在 29% —43% 之间, 和前述相关分析的精度相比, 误差要大一些。悬沙浓度的计算直接依赖于标定参数 c' , 整个剖面的平均 c' 和各实测点的 c' 相接近的话, 用 $\overline{c'}$ 计算出来的悬沙浓度就准确。在各个潮时剖面中, 各实测点的 c' 与剖面平均 c' 有一定的波动, 因而造成了整个剖面计算出的结果有较大的误差。如果比较两个测站不同潮时的剖面平均 c' (表 2), 可以看出两个站位不同潮时剖面的平均 c' 十分接近, 也就是说如果以某个潮时的剖面平均 c' 去计算其它潮时的悬沙剖面, 结果将和以该剖面的平均 c' 计算的结果相接近。

2.2.2 相同深度标定 虽然同一剖面不同深度的 c' 之间有一定的波动, 但同一深度不同潮时的 c' , 它们却十分接近。为了提高统计的样本数量, 将两个测站的深度相近的样本合并为 4 个深度段进行统计计算, 以各深度的平均 c' 计算不同潮时的相对平均误差(表 3)。从表中可以看出, 除去 25m 之外的 3 个深度段的相对误差基本上小于 15%。T 2 站最底层 25m 深度相对误差较大为 65. 4%, 由于海底的反射强度较大, 干扰了近底层(对于本文所用的 ADCP, 这一层厚度相当于水深的 6%) 的反射信号, ADCP 采用插值的方法

求出底层的回声强度,所以这一层的误差相对较大,一般情况下不使用 ADCP 近底层的数据。总的来说,深度对 C' 的影响很大,不同深度的 C' 相差较大,而同一深度相差很小。因此,ADCP 悬沙校正时,要按不同的深度层分别进行标定,以获得更好的精度。根据现有的结果来看,对不同的深度段分别进行标定,确定不同深度段的标定参数 C' ,以此计算出的悬沙剖面的相对误差可以达到 20% 以下。郭纪捷等(1998)通过现场标定 ASSM 声学悬浮泥沙观测仪的研究,指出用特征时刻进行标定可获得较好的测量精度,所得数据的统计误差为 20%,能满足海洋工程的需要。本文研究的观测时间较短,没有覆盖各种潮时,因而不能分析用特征时刻标定的结果。如果在现场标定中,按较密集的深度间隔采样(本文所用 ADCP 的水层单元间隔为 1m,采水样深度间隔取 2m 即足够),应能获得更好的测量精度。因此,运用现场标定的方法,分深度段进行标定,ADCP 观测悬沙浓度的精度可满足沉积动力学研究的需要。

3 讨论

3.1 影响 ADCP 测量精度的因素

方程(2)中总后散射截面写成平均后散射截面面积和颗粒数量浓度的积,这是一个简化的表达式,完整的表达式应写成: $\alpha_{bs} = \sum_1^n N_i \sigma_i$ (14)

i 表示不同的颗粒粒径, N_i 为 i 粒径的数量浓度,为 σ_i 粒径的后散射截面,方程(14)中 N_i 可用质量浓度 C_i 代替: $\alpha_{bs} = \sum_1^n \frac{C_i \sigma_i}{\rho_g \frac{4}{3} \pi a_i^3}$ (15)

式中为 σ_i 粒径颗粒的密度, a_i 为 i 粒径颗粒的粒径。本文研究所用的 ADCP 实用波长(λ)为 5mm (Gordon, 1996),而海水中悬沙的粒径一般在 1mm 以下,所以 $2\pi \lambda \ll 1$,即满足瑞利散射。在此情况下,对于球形颗粒(这里使用的是液球模式,考虑到悬沙组成中有生源物质)(Stanton, 1989):

$$\sigma_i = \frac{2\pi}{\lambda} a_i^6 \pi_s^2$$
$$a_{\pi_s} = \frac{1 - \frac{g'}{h'} \frac{h'^2}{2}}{3g} + \frac{1 - \frac{g'}{2h'}}{1 + \frac{g'}{2h'}}$$

(16)

式中, g' 为颗粒的密度与海水密度之比, h' 为颗粒中声速与海水中声速之比。如果假定不同粒径沉积物密度等物理性质相似,则

$$Sv = 10 \lg \alpha_{bs} = 10 \lg k' \sum_1^n c_i a_i^3$$
$$k' = \frac{3a_{\pi_s}^2}{2\rho_g}$$

(17)

表 3 相同深度段不同潮时悬沙浓度
标定结果的平均相对误差

Tab. 3 Mean relative errors of the concentration calculations
time-averaged C' values for the various depths

采样水深(m)	平均相对误差(%)	样本数
5—11	15.6	10
13—17	7.2	7
20—22	13.3	5
25	65.4	3

k' 为常数。从方程(17)可以看出, S_v 依赖于悬沙的粒径分布。如果类似的按照平均粒径的定义 $\left[\sum_i^n c_i a_i\right]$, 可以把 $\sum_i^n \frac{4}{3}\pi c_i a_i^3$ 定义为平均体积的话, S_v 更确切的说依赖于悬沙的体积分布。体积与粒径之间为 3 次方的关系, 粒径分布微小变化可以带来体积分布的显著变化。方程(5)假定观测期间悬沙的粒径没有变化, 但实际上, 不同深度、不同时刻的悬沙粒径有一定的变化; 另外, 实际影响后散射强度的是悬沙的体积, 由于体积是粒径的三次方函数, 因此由悬沙体积的变化造成的后散射强度的变化就更为显著。表 4 列出了 T1 站不同潮时剖面悬沙的平均粒径和平均体积, 从中可以看出, 悬沙的平均粒径和平均体积存在一定的变化, 其中, 平均粒径的变化较小, 但平均体积的变化却大得多。因此, 用方程(5)推导出的悬沙浓度的计算公式(方程 11), 会有一定的误差。

表 4 T1 测站不同潮时悬沙平均粒径和平均体积

Tah 4 Mean particle size and volume for the samples from Station T 1

水深(m)	低潮		高潮	
	平均粒径(μm)	平均体积(μm ³)	平均粒径(μm)	平均体积(μm ³)
5	5.9	3603.07	6.74	5249.23
9	6.03	3771.53	6.19	3965.27
11	6.33	4706.27	6.89	5687.75
17	5.98	3769.71	6.77	5379.96
20	6.91	5616.66	7.92	7997.9

3.2 操作系统误差

ADCP 的设计目的是用来测流速的, 利用它的回声强度计算悬沙浓度只是它的“副产品”。从仪器的设计操作来说, ADCP 测量悬沙浓度有一定的不足。首先, 海水中声速的确定, ADCP 需要用声速来计算探头到水层的距离(Deines, 1999)。声速与海水的温、盐度有关, 而不同深度水层的温、盐度有一定的差异。在实测观测中, 如果不能实测声速或用 CTD 数据进行现场校正, 只能使用 ADCP 设定值(本文所用 ADCP 设定为 1536m/s), 这样会产生误差。其次, 海水的吸收系数依赖于声波频率和海水温、盐度等参数。本文所用的 ADCP, 系统默认为 0.069(dB/m), 选取的水温为 4℃, 盐度为 35, 海面的吸收系数为 0.062—0.084dB/m 中的一个值。因而, 用系统设定的水体吸收系数计算声波由水体吸收产生的损失时, 会有一定的误差。声速和吸收系数也许是决定 ADCP 现场标定受深度影响的主要原因。

总之, ADCP 不是专门为用于悬沙观测而设计的仪器, 系统误差在所难免, 这有待于仪器设计的进一步提高。ADCP 测量悬沙浓度的意义在于, 它可以同时测量流速, 从而能直接得出悬沙通量。此外, ADCP 可以走航、定点观测, 在沉积动力学研究中有直接的使用价值。ADCP 测量悬沙浓度的主要前提条件是假定悬沙的粒径、密度等主要物理性质在观测期间变化很小。从本文的分析来看, 这一分析前提是可以满足的。现场标定分析表明, 深度对 ADCP 测量精度有密切关系。这实际上反映了与深度密切相关的海水温、盐度对声速和海水的吸收系数的影响, 如果现场测定声速和确定海水吸收系数, ADCP 测量悬沙浓度的精度会得到进一步的提高。在使用 ADCP 系统设定的声速和海水吸收系

数时,如果按不同深度段分别标定,测量悬沙浓度的精度仍可满足沉积动力学的需要。

4 结语

4.1 根据水样悬沙浓度和 ADCP 平均体积后散射强度的相关分析,悬沙粒径在观测期间没有很大变化的情况下,后散射强度与水样悬沙浓度之间存在较好的相关性。

4.2 悬沙浓度剖面标定公式中的标定参数 C' 与深度密切相关,同一剖面不同深度的 C' 值有一定的波动,但同一深度不同潮时的 C' 之间则变化很小。使用同一剖面的平均 C' 值计算出的剖面悬沙分布误差较大,为 29%—43%,而按不同深度段分别标定,误差可以小于 20%,能够满足沉积动力学研究的需要。

4.3 ADCP 不是专门设计用来测量悬沙浓度的仪器,其操作系统和标定方法中存在着一定的不足,这有待于仪器设计的提高和今后的进一步研究。

致谢 官晨钟、刘敬圃、王桂芝、范奉鑫、董太禄、徐涛协助参加了野外采样,中国科学院海洋研究所“金星二号”全体船员提供了海上调查的后勤支持,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 汪亚平,高 抒,李坤业,1999. 用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究. 海洋与湖沼, 30(6): 758—763
- 郭纪捷,任来法,李允武,1998. 声学悬浮泥沙观测数据现场标定研究. 海洋学报, 20(5): 120—125
- Batchelder H P, VanKeuren J R, Vaillancourt R *et al*, 1995. Spatial and temporal distributions of acoustically estimated zooplankton biomass near the Marine Light-Mixed Layers station (59°30'N, 21°00'W) in the north Atlantic in May 1991. J Geophys Res, 100(C4): 6549—6563
- Crawford A M, Hay A E, 1993. Determining suspended sand size and concentration from multifrequency acoustic backscatter. J Acoust Socie Amer, 94(6): 3312—3324
- Deines K L, 1999. Backscatter estimation using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers. San Diego(USA) RD Instruments, 1—80
- Flagg C N, Smith S L, 1989a. On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance. Deep Sea Res, 36(3): 455—474
- Flagg C N, Smith S L, 1989b. Zooplankton abundance measurements from acoustic Doppler current profilers. Proceedings of OCEAN'89, Marine Technology Society and IEEE, Seattle WA, 18—21
- Gordon R L, 1996. Acoustic Doppler Current Profiler: principles of operation a practical primer(2nd edition). San Diego (USA) RD Instruments, 1—51
- Griffiths G, Diaz J I, 1996. Comparison of acoustic backscatter measurements from a shipmounted Acoustic Doppler Current Profiler and an EK500 scientific echo-sounder. ICES J Marine Scie, 53: 487—491
- Hanes D M, Vincent C E, Huntley D A *et al*, 1988. Acoustic measurements of suspended sand concentration in the C₂S² experiment at Stanhope Lane, Prince Edward Island. Marine Geology 81: 185—196
- Heywood K S, Scope-Howe S, Barton E D, 1991. Estimation of zooplankton abundance from shipborne ADCP backscatter. Deep Sea Res, 38(6): 677—691
- Heywood K J, 1996. Diel vertical migration of zooplankton in the Northeast Atlantic. J Plankt Res, 18(2): 163—184
- Holdaway G P, Thorne P D, Flatt D *et al*, 1999. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. Contin Shelf Res, 19: 421—441
- Iida K, Mukai T, Hwang D, 1996. Relationship between acoustic backscattering strength and density of zooplankton in the sound-scattering layer. ICES J Marine Sci, 53: 507—512
- Land J M, Kirby R, Massey J B, 1997. Developments in the combined use of acoustic Doppler Current Profilers and profiling siltmeers for suspended solids monitoring. In: Burt N, Parker R, Watts J ed. Cohesive Sediments. John Wiley & Sons,

New York, 187—196

- Libicki C, Bedford K W, Lynch J F, 1989. The interpretation and evaluation of a 3-MHz acoustic backscatter device for measuring benthic boundary layer sediment dynamics. *J Acoust Soci Ameri*, 85(4): 1501—1511
- Lynch J F, Gross T F, Brumley B H *et al*, 1991. Sediment concentration profiling in HEBBLE using a 1-MHz acoustic backscatter system. *Marine Geology*, 99: 361—385
- Thorne P D, Hardcastle P J, Soulsby P L, 1993. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. *J Geophys Res*, 98 C1: 899—910
- Roe H S J, Griffiths G, 1993. Biological information from an Acoustic Doppler Current Profiler. *Marine Biology*, 115: 339—346
- Roe H S J, Griffiths G, Hartman M *et al*, 1996. Variability in biological distributions and hydrography from concurrent Acoustic Doppler Current Profiler and Sea Soar surveys. *ICES J Marine Sci*, 53: 131—138
- Shi Z, Ren L F, Zhang S Y *et al*, 1997. Acoustic imaging of cohesive sediment resuspended and re-entrainment in the Changjiang Estuary, East China Sea. *Geo-Marine Letters*, 17: 162—168
- Stanton T K, 1989. Simple approximate formulas for backscattering of sound by spherical and elongated objects. *J Acoust Soc Ameri*, 86(4): 1499—1510
- Woodward W E, Appell G F, 1986. Current velocity measurements using Acoustic Doppler Backscatter: a review. *IEEE, J Ocean Engineering*, OE-11: 3—6
- Zhou M, Nordhausen W, Huntley M, 1994. ADCP measurements of the distribution and abundance of euphausiids near the Antarctic Peninsular in winter. *Deep Sea Res*, 41(9): 1425—1445

SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION MEASUREMENTS WITH ADCP: FEASIBILITY ANALYSIS AND *IN SITU* CALIBRATION

CHENG Peng, GAO Shu

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

Abstract For more than a decade, it has been recognized that the back-scattered ADCP signal can be used to extract information on suspended objects. The present work, based on *in situ* measurements of suspended sediment concentrations by filtering of water samples and calculation of mean volume back-scattering strength (S_v) of a 307.2 kHz BBADCP, assesses the potential of ADCPs to measure the concentration quantitatively. Regression analysis shows that good correlation exists between the concentration (measured by filtration) and S_v , and the mean relative error is less than 10%. These results suggest that the ADCP has the ability to measure the concentration under the condition that the grain size distribution of suspended material varies little during the survey period. An *in situ* calibration formula has been developed and used to calculate the suspended sediment concentration profile. The results indicate that the calibration parameter C' varies with the depth, but its temporal variation is small at the same depth during a tidal cycle. Thus, the statistical error of concentration calculation associated with a profile-averaged C' value by the formula obtained ranges between 29% and 43%, and it becomes less than 20% when a time-average value for different depths of the profile is used. The present study demonstrates the potential of ADCPs for direct measurement of suspended sediment concentration profiles.

Key words ADCP, Suspended sediment concentration, *In situ* calibration