

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*

兰志刚 龚德俊 于新生 李思忍 徐永平

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 利用后散射强度(ABS)估计悬浮沉积物浓度原理,根据 Rayleigh 散射理论,给出了利用现场粒径分析仪与声学多普勒流速剖面仪(ADCP)同步测量悬浮沉积物浓度的粒径修正方法,并推导出了一种新的、用于对 ABS 进行粒径修正的等效粒径计算公式(9)。利用这一公式并结合 LISST-100 所测的粒径分布信息,可以对 ADCP 所测的 ABS 进行粒径修正,其修正方法见式(10)。结合利物浦湾和 Anglesey 周边海域的现场采样、测量及其分析结果,对上述粒径修正方法进行了验证。分析结果表明,采用上述公式进行粒径修正后,ADCP 测量悬浮沉积物浓度的精度有较大幅度的提高,线性拟合的相关系数从 0.65—0.71 提高到 0.78—0.88。

关键词 ADCP, 悬浮沉积物, 粒径修正, 后散射强度

中图分类号 P736.21

利用水声后散射强度反演悬浮沉积物浓度(SSC)的测量技术,以其对流场的无创性以及很好的时空解析度,吸引了越来越多研究人员的关注(吴加学等,2003;Lynch,1985)。这一尝试起始于80年代中期(Hess *et al.*,1985;Lynch,1985);Libicki等(1989)比较详细地描述了利用ABS反演SSC的理论方法;Thorne等(1991,1992)对不同悬浮沉积物的后散射特性进行了大量的研究,并利用散射理论给出了声学测量悬浮沉积物浓度的反演公式。近年来,利用作为成熟测流产品ADCP进行SSC测量,逐渐成为SSC声学测量研究中的一个热点(Jones *et al.*,1994);Deines(1999)对利用ADCP测得的回波强度来反演SSC,从理论上做了较详细地描述和推导。国内于90年代末期,也对这一领域进行了研究和探索,汪亚平等(1999)利用ADCP对海洋中悬沙浓度进行走航式测量,取得了相当好的测量结果;程鹏等(2001)对利用ADCP测量悬沙浓度的现场标定方法进行了研究。

除了测量的无创性以及相对较强的抗附着能

力外,ADCP可以连续同时测量整个水体垂直断面的流速及回波强度,这不仅提高了测量的时空解析度,而且使得利用单一设备获取多个悬浮沉积物动力学特性,并继而推算出悬浮沉积物输运量成为可能。然而,由于单频回声测量不能区分散射体浓度的变化和粒径的变化,因此要获得准确的悬浮沉积物浓度测量结果,需要利用所测得的粒径分布信息,对ABS进行修正。Hay等(1992)利用多频声信号对悬沙的浓度和粒径测量进行了开创性的研究,给出了利用多频ABS进行悬沙粒径修正的方法。但是由于如下因素的限制,这一测量方法实现起来难度很大:其一,测量引入的粒径估计偏差较大;其二,不同频率信号比的选择与悬沙的初始粒径估计有关;其三,测量设备需要专门研制。由于市场上现有的多普勒测流设备给出的均为单频信号,因此使用单频ADCP并结合其他现场粒径分析设备进行悬浮沉积物的研究,在现阶段将是很好的选择。作者进行本研究的目的在于:

1) 描述利用回声强度(ABS)估计悬浮沉积

* 中国科学院重大科技合作项目, H42032602 号; 中国科学院海洋研究所知识创新领域前沿项目, L84032609 号; 中国科学院留学基金项目, 2002—2003。兰志刚, 高级工程师, E-mail: moon@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2003-02-05, 收修改稿日期: 2004-05-16

物浓度的原理,并给出 ADCP 测量 SSC 的校准公式。

2) 根据 Rayleigh 散射理论,给出一种新的用于进行 ABS 粒径修正的等效粒径计算公式,并推出一种利用粒径分析仪粒径分布信息对 ABS 反演 SSC 进行修正的校准公式。

1 测量原理

悬浮沉积物的声学测量基于以下物理学原理:源散射强度的大小与散射水体中悬浮物浓度的大小成正比(Thorne, 1991)。ADCP 所发射的声波在水中传播时由于球面扩散以及介质吸收,将产生能量衰减,因此在计算源散射强度时,必须用声波的几何衰减和吸收衰减进行修正(Urick, 1983)。

根据声纳方程,可以得到如下修正结果(Urick, 1983):

$$EL = (E - E_r) + 20 \times \lg(R\Psi) + 2\alpha_t R + C \quad (1)$$

式中, EL 为源散射强度, E 为 ADCP 记录的回声强度, E_r 为噪声强度, R 为悬浮沉积物散射体沿换能器波束方向离接收换能器表面的距离, C 为与发射接收换能器系统以及声散射体物理特性有关的系数。通常情况下,对于给定的工作模式,与声换能器系统相关的物理量是不随时间变化的,因此可以看作是常量。当声散射体物理特性也不随时空变时, C 可以看作常数。 $\alpha_t = \alpha_w + \alpha_s$ 为海水中总的声波吸收系数,式中 α_w 为海水对声波的吸收系数,可以由以下经验公式确定(Fisher *et al.*, 1977):

$$\alpha_w = (55.9 - 2.37T + 0.0477T^2 - 0.000384T^3) \times 10^{-3} \times f^2 \quad (2)$$

式中 T 为海水温度, f 为声波频率。 α_s 为悬浮沉积物对声波的吸收系数,与散射体的散射以及粘滞吸收特性有关,它由以下公式算出(Hay, 1991; Thorne *et al.*, 1992):

$$\alpha_s = \frac{1}{r} \int_0^r \zeta(r) M(r) dr \quad (3)$$

式中 $\zeta(r)$ 为悬浮沉积物的声衰减系数, $M(r)$ 为悬浮沉积物的浓度。由于回声强度修正中包含 SSC, 因此利用 ABS 反演计算 SSC 时, 必须进行多次迭代计算才能得出准确的 SSC。根据 Hay 等(1992)的研究, 当悬浮沉积物的体积浓度低于百分之一时, 其引起的声波衰减可以忽略。式(1)中

的 Ψ 为近场修正函数, 当 $r > \varepsilon r_n$ 时, $\Psi = 1$; 当 $r < \varepsilon r_n$ 时, $\Psi = \frac{1}{3} (2 + \varepsilon \frac{r_n}{r})$; 其中 $r_n = \pi \frac{\alpha_t^2}{\lambda}$, α_t 为换能器有效辐射半径, λ 为声波波长, ε 为一经验常数。根据 Downing 等(1995)的研究, 通常取 $\varepsilon = 2$ (实际上当 $\varepsilon = 2$ 时, εr_n 为 Rayleigh 距离)。对于 RDI 公司生产的 ADCP, 其接收的后散射强度以 RDI 特定的单位(count)来记录, 如果以 dB 为单位来表示, 则还需乘以一个转换系数 K_c 。考虑到水温对声传播速度即而对散射体距离估计的影响, 因此, 其后散射强度可以表示为(Deines, 1999):

$$EL = K_c (E - E_r) + 20 \times \lg(R\Psi) + 2\alpha_t R + 10 \times \lg(273.16 + T) + C \quad (4)$$

利用修正过的后散射强度和同步进行的同一深度的水样测量结果进行回归分析, 可得如下结果:

$$10 \times \lg M = A \times EL + B \quad (5)$$

式中 A 、 B 分别是用线性拟合方法所求得的斜率及截距, 由上式可以求得 SSC。

2 利用粒径分布信息对 ABS 进行修正的理论方法

多年来的研究表明, 声散射的强度不仅与散射体的浓度有关, 而且与散射体的其它物理特性如散射体的粒径大小、比重等参数有关。因此, 单频后散射测量不能区分散射体浓度的变化和粒径的变化, 要获得准确的悬浮沉积物浓度测量结果, 必须利用同步测量所测得的粒径分布信息, 对 ABS 进行修正。美国 Sequoia Scientific, Inc 公司生产的 LISST-100 型粒径分析仪, 利用激光衍射技术, 来现场测量水体中悬浮颗粒的分布特征(PSD)。当光源发射的平行激光束入射到水体时, 由于水体中的悬浮颗粒的存在, 将产生散射现象, 其前向散射的散射角的大小与散射体的粒径大小呈一定的比例关系。LISST-100 的检测器可以检测出不同角度范围内的散射强度, 由此可反演出散射体的粒径分布特征, 并给出各个谱段颗粒的体积浓度值。激光衍射法测量 PSD 的一个主要优点就是测量基本上不受散射体成分及其折射率的影响, 因此在 PSD 的测量中, 得到了广泛的应用。利用 LISST-100 所测得的 PSD, 便可以计算出悬浮颗粒的声散射等效半径, 对声学仪器测得的 ABS 进行粒径修正, 从而更准确地估计海洋中悬浮沉

积物的浓度值。

根据声学散射理论,当 $ka < 1$ 即声波波长大于散射体粒径时(其中 k 为声波波数, a 为散射体半径),将产生 Rayleigh 散射。此时,单个球体散射体的后散射函数由可用以下公式求得 (Clay *et al.*, 1977):

$$\varphi_{bs} = \frac{(ka)^4}{\pi} \left[\frac{e-1}{3e} + \left(\frac{g-1}{2g+1} \right) \right]^2 \quad (6)$$

式中, e 为散射体与介质的弹性系数比, g 为散射体与介质的密度之比。由上式可以求出后散射截面:

$$\sigma_{bs} = \varphi_{bs} * A = \pi a^2 \varphi_{bs} = \pi a^2 \frac{(ka)^4}{\pi} \left[\frac{e-1}{3e} + \left(\frac{g-1}{2g+1} \right) \right]^2 \quad (7)$$

式中 A 为散射体的投影截面面积。当散射体在空间随机分布且浓度较低时,单位体积内的散射体总散射截面可以以单个散射体散射截面的累加和来表示,即: $S_V = \sum_i N_i \sigma_{bsi}$

式中 N_i 为单位体积内散射截面为 σ_{bsi} 的散射体个数。假设研究水域的总的悬浮沉积物的浓度为 M , 粒径为 a_i 的悬浮沉积物浓度为 M_i , 则在体积为 δV 的水体中,悬浮颗粒的总散射截面为:

$$\begin{aligned} S_V &= \sum_i N_i \sigma_{bsi} = \sum_i \frac{M_i \delta V}{\frac{4}{3} \pi \rho_i a_i^3} \sigma_{bsi} \\ &= \sum_i \frac{3(ka_i)^4}{4\pi \rho_i a_i} \left[\frac{e_i-1}{3e_i} + \left(\frac{g_i-1}{2g_i+1} \right) \right]^2 M_i \delta V \end{aligned} \quad (8)$$

由上式可见,散射强度在 Rayleigh 散射条件下与粒径的三次方及散射体浓度呈正比。假设除了粒径大小之外,悬浮沉积物的其它物理性质相同,即 e, g, ρ 为常数。可以将散射强度表示为:

$$I_{bs} \sim \sum_i a_i^3 M_i = a^3 M$$

上式中 a 定义为散射体的等效粒径:

$$a = \sqrt[3]{\frac{\sum_i a_i^3 M_i}{M}} \quad (9)$$

由此,可以根据上式,利用 LISST-100 所测的粒径分布信息对 ADCP 所测的 ABS 进行修正,因为后散射强度与散射体粒径的三次方呈正比,需要在式(4)中增加反映粒径变化的修正量,所以最终修正公式变为:

$$EL = K_c(E - E_r) + 20 \times \lg(R\Psi) - 30 \times \lg a +$$

$$2\alpha_r R + 10 \times \lg(273.16 + T) + C \quad (10)$$

3 实验方法及现场观测

作者与英国威尔士大学海洋科学系共同合作,结合悬浮沉积物输运过程动力特性的研究,对利用 ADCP 进行 SSC 测量的测量方法以及修正方法进行了多方面的合作研究。试验使用的设备包括美国 RDI 公司生产的 600kHz 宽带声学多谱勒海流剖面仪,用于测量仪器布放水域的海流以及后散射强度剖面。ADCP 所测得的后散射强度信号将与现场采集的水样进行比较,并用 LISST-100 所测得的悬浮沉积物粒径分布结果进行进一步修正。试验分别于 2001 年 9 月和 2003 年 2 月在利物浦湾(地理坐标为 53°31.890'N, 3°21.896'W, 平均水深约 29m, 采样间隔为 1h)、Anglesey 岛周边海域(1 号站位地理坐标为 53°22.316'N, 4°11.802'W, 平均水深约 22m; 2 号站位地理坐标为 53°52.841'N, 5°54.693'W, 平均水深约 44m, 采样间隔为 0.5h)以定点观测的方式进行。ADCP 在利物浦湾以坐底的方式布放,数据采集频率为 0.5Hz,采样垂直剖面的空间分辨率(水层厚度分辨率)为 1m;在 Anglesey 岛周边海域的布放则采用悬吊方式,数据采集频率为 0.5Hz,水层厚度分辨率设置为 2m(由于悬浮沉积物测量在本次出海试验中只作为附带测量,故 ADCP 参数设置并非最佳);现场所采集的 1000ml 水样用 0.45μm 滤膜过滤,经烘干称重,比较滤前和滤后的重量来获得现场水样中悬浮沉积物的浓度实测值 (Alvarez *et al.*, 2002),用于对 ADCP 的测量进行标定。在采集水样的同时,使用 LISST-100 对同一采样点水体所含悬浮沉积物的粒径分布特征进行同步测量,以检验 ADCP 测量 SSC 的粒径分布修正模型。同时 CTD 上安装的光学透射仪对同一采样区域进行剖面测量,获取的测量结果用于和 ADCP 的测量结果进行比较。

4 数据分析及结果

在利用公式(10)对悬浮沉积物浓度进行反演估计之前,必须对 ADCP 所测得的后散射强度值进行一些必要的预处理,以保证测量结果的准确性。首先,对回波信号作去尖峰处理。以每一百个数据为分析单位,对数据值大于平均值 4 倍方差以上的数据作上“坏数据”标记;用好数据重新计算平均值和标准方差作为本数据组均值和方差的估计值,并以此 2 值来最终判别数据的好坏,从

而实现数据的第一次平滑滤波。其次,由于散射体位置的不确定性将导致接收信号幅度产生随机起伏,其起伏符合 Rayleigh 分布特征,因此必须对接收到的信号进行集合平均处理,才能有效地降低测量的随机误差。进行集合平均时,将尖峰信号去除,并用线性插值来替代去除的尖峰信号。ADCP 的采样频率为 0.5kHz,5min 的样本集中将包含 150 个样本,因此既可以有效地降低随机误差,也不会影响测量的时空分辨率。修正时还应注意,由于 ADCP 四个波束与中心线间有 20° 的夹角,因此公式(10)应使用下面公式予以修正(Deines, 1999):

$$R = \left[\frac{r_1 + ((N - 1) \times D) + (D/4)}{\cos\theta} \right] \quad (11)$$

式中 r_1 为第一水层水体到换能器表面的垂直距离, D 为水层厚度, N 为水层序数。由于 ADCP 在每一水层的最后四分之一处进行取样,因此计算时,追加 $D/4$ 作为补偿。

最后,还必须根据采水器采样的时间和深度值,抽取出 ADCP 相应时间和位于远场水层的后散射信号进行上述平均处理,作为接收声强信号的估计值。对于采集深度位于上述范围之外的水样拟合时予以剔除。LISST-100 的采样采用上述相似的办法进行去尖峰滤波,然后作深度平均处理,形成最终的测量估计剖面。

图 1 给出了 LISST-100 在利物浦湾测得的悬浮沉积物粒径随时间和深度变化的等值线图,可以发现悬浮颗粒的粒径大小基本上在 120—160 μm 之间变化。LISST-100 对 Anglesey 岛周边海域的测量也显示,1 号站位水域中的悬浮沉积物粒径在 130—155 μm 之间变化;2 号站位水域的在 140—170 μm 之间变化。对于频率为 600kHz 的 ADCP 而言, $ka < 1$, 满足 Rayleigh 散射条件,同时试验海域的 SSC 较低,因此可以用式(10)进行校

正,反演得出 SSC 的剖面测量结果。

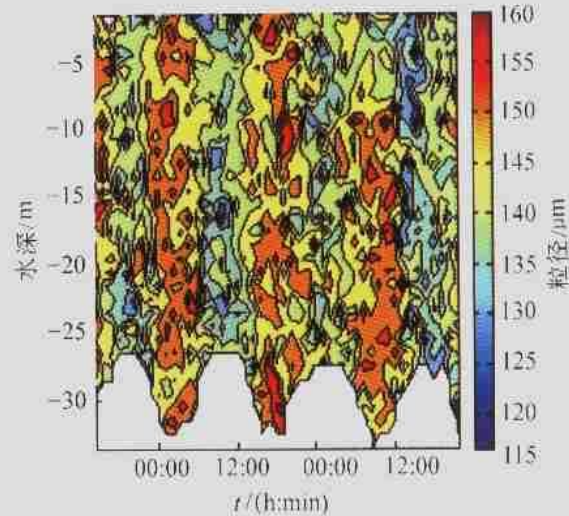


图 1 在利物浦湾站位由 LISST-100 测得的悬浮沉积物平均粒径随深度和时间的变化
(第一个 00:00 为 2001 年 9 月 4 日 0 时;
第二个为 9 月 5 日 0 时)

Fig. 1 Spatial and temporal distribution of mean size of suspended sediment in Liverpool Bay (The first 00:00 denotes zero hour on 2001/09/04 while the second on 2001/09/05)

如果假定除了粒径大小之外,悬浮沉积物的其它物理性质是相同的,可以用 LISST-100 所测得的各个粒径谱段上的体积浓度代替式(9)中的 M_i ,以总体积浓度代替 M ,结合各粒径谱段的粒径尺寸值 a_i 从而计算出等效粒径 a_e ; (10) 式中 K_c 可以由用户根据厂家说明书指定的方法进行测定,通常约为 0.45; R 为水体到 ADCP 换能器表面的距离,计算时先将采样水深折算成对应的 ADCP 水层序数,再代入(11)式计算; T 为相应深度的水温; C 为一与 ADCP 系统参数有关的量,由于 ADCP 在工作过程中参数设置不变,因此可以当作常数处理; E_i 可以看作常数。表(1)列出了在利物浦湾测得的主要相关数据以及分别利用公式(4)、(9)、(10)计算的 ABS 和等效粒径参数。

表 1 利物浦湾测得和计算数据一览表¹⁾

Tab. 1 List of data collected in Liverpool Bay and its correction

| 采样水深 (m) | 无粒径修正的 ABS (dB) | 粒径修正后的 ABS (dB) | 称重法测量的 悬浮沉积物浓度 (mg/L) | LISST-100 测得的 平均粒径 (μm) | 公式(9)算得的 等效粒径 (μm) |
|-------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| 26.50 | 83.45 | 16.38 | 3.64 | 143.62 | 172.05 |
| 29.50 | 85.14 | 19.53 | 6.69 | 144.99 | 153.84 |
| 29.50 | 84.38 | 17.68 | 4.18 | 152.24 | 167.21 |

续表

| 采样水深 (m) | 无粒径修正的 ABS(dB) | 粒径修正后的 ABS(dB) | 称重法测量的 悬浮沉积物浓度 (mg/L) | LISST-100 测得的 平均粒径 (μm) | 公式(9)算得的 等效粒径 (μm) |
|-------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| 25.50 | 85.16 | 19.00 | 5.66 | 146.21 | 160.54 |
| 30.50 | 85.00 | 19.10 | 6.20 | 142.41 | 157.35 |
| 30.50 | 84.41 | 16.47 | 3.66 | 153.35 | 183.85 |
| 31.50 | 82.35 | 13.72 | 3.18 | 157.07 | 193.99 |
| 26.50 | 81.73 | 14.21 | 3.04 | 145.08 | 178.16 |
| 30.50 | 85.22 | 18.33 | 5.64 | 142.43 | 169.71 |
| 31.50 | 80.98 | 13.34 | 2.98 | 154.58 | 179.78 |
| 31.50 | 82.41 | 14.47 | 3.49 | 148.55 | 183.99 |
| 28.50 | 85.89 | 19.06 | 3.74 | 148.21 | 168.93 |
| 26.50 | 84.59 | 20.90 | 6.74 | 131.65 | 132.75 |

1) 粒径修正前线性拟合系数 $A = 0.639, B = -77.2$, 粒径修正后线性拟合系数 $A = 0.476, B = -31.8$

从表 2 中可以看出,利用 LISST-100 测得的粒径分布信息并借助于公式(9)和(10)对 ADCP 测得的 ABS 进行修正以后,预测结果有了较大的提

高,相关系数的提高幅度均大于 12%; Anglesey 外海 1 号站位的提高幅度达到了 20%。

表 2 粒径修正前后线性拟合相关系数的对比

Tab. 2 Comparison of linear fitting correlation coefficients calculated with and without PSD correction

| 采样地点 | 有效样本数 | 无粒径修正时的 相关系数 | 有粒径修正时的 相关系数 | 相关系数 提高幅度(%) |
|-------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 利物浦湾 | 13 | 0.74 | 0.88 | 18.9 |
| Anglesey 外海 1 号站位 | 10 | 0.65 | 0.78 | 20.0 |
| Anglesey 外海 2 号站位 | 8 | 0.71 | 0.80 | 12.7 |

图 2 和图 3 显示了分别利用公式(4)和公式(10)对利物浦湾采集到的数据进行修正后,预测模型的曲线拟合结果的变化。由图 2 和图 3 可以看出,经本文中给出的粒径修正模型修正后,拟合曲线有较明显的改观。

粒径分布修正对 ABS 反演 SSC 精度的提高,也可以从图 4 和图 5 看出。图 4 是 ADCP 的第 2 水层在利物浦湾测得的 SSC 随时间变化的曲线,其中圆圈表示经水样分析获得的 SSC 实测值,三角表示经过粒径修正后所获得的 SSC 预测值,方块为无粒径修正时的预测值。图 4 中第一个 12:00 为 2001 年 9 月 4 日中午 12 时,第二个为 2001 年 9 月 5 日 12 时。图 5 是 ADCP 的第 3 水层在 Anglesey 外海第一站测得的 SSC 随时间变化的曲

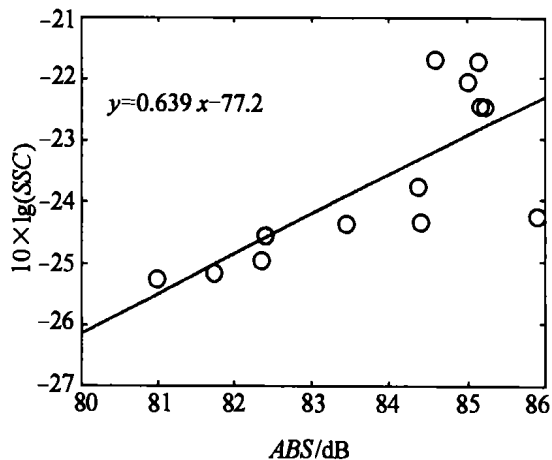


图 2 无粒径修正时的测量拟合曲线(利物浦湾)

Fig. 2 Linear fitting without PSD correction

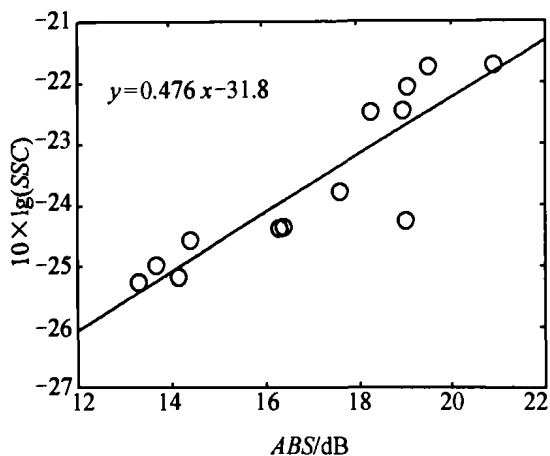


图3 有粒径修正时的测量拟合曲线(利物浦湾)

Fig. 3 Linear fitting with PSD correction

线,图中符号含义与图4相同,采样日期为2003年2月13日。从图4和图5可以看出,ADCP所测得的ABS经粒径校准方法修正以后,其测量精度有了较大的提高。

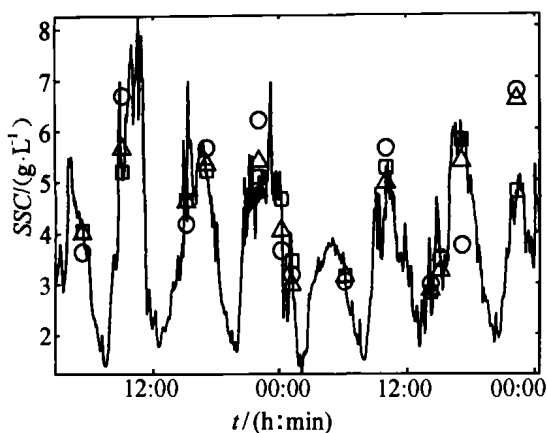
图4 ADCP第2水层(离底面3m处)在利物浦湾测得的SSC($\times 10^{-3}$)变化曲线

Fig. 4 SSC inverted from ABS measured by ADCP deployed in Liverpool Bay

需要强调说明的是,在模型的建立过程中,假定除了粒径大小之外,悬浮沉积物的其它物理性质是相同的。而在现实海洋中,悬浮沉积物的物理性质是复杂多变的,尤其是海洋底层,其悬浮沉积物除了粒径随潮汐海流等物理因素变化之外,其组成成分、密度等物理量也将产生变化,这些都将给声学测量悬浮沉积物浓度带来误差。另外,海水中的浮游生物、气泡以及盐度、温度变化引起的声阻抗的变化,甚至湍流的存在,都将影响回波

强度的幅度值,从而给测量带来误差,所以在计算时还需要尽可能地综合考虑上述因素的影响,从而获得更为准确的测量效果。

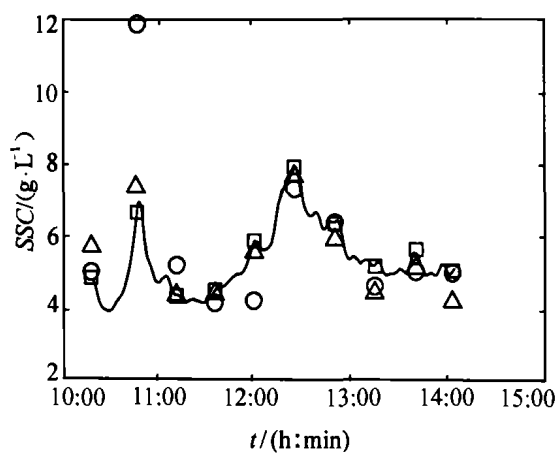
图5 ADCP第3水层(离海平面6m处)在Anglesey外海测得的SSC($\times 10^{-3}$)变化曲线

Fig. 5 SSC inverted from ABS measured by ADCP deployed in the offing of Anglesey

5 结论

利用ADCP所测得的后散射强度(ABS)来测量海洋悬浮沉积物浓度(SSC)可以大大的提高SSC测量的时空解析度,对悬浮沉积物动力特性的研究有很大的帮助。由于ABS对散射体粒径的依赖性,只有对测量结果进行粒径修正才能获得更为准确的测量结果。作者根据Rayleigh散射理论,给出了现场粒径分析仪与ADCP同步测量悬浮沉积物浓度的粒径修正方法,并推导出了—种新的、用于对ABS进行粒径修正的等效粒径计算公式。当散射体在空间随机分布且浓度较低,且假设除了粒径大小之外,悬浮沉积物的其它物理性质相同,则其综合散射强度正比于散射体等效粒径的三次方与悬浮沉积物浓度的积,散射体等效粒径的表达方法见式(4)。利用这一公式并结合LISST-100所测的粒径分布信息,可以对ADCP所测的ABS进行粒径修正,其修正方法见式(10)。

结合利物浦湾和Anglesey周边海域的现场采样、测量及其分析结果,对上述粒径修正方法进行了验证。结果表明,采用上述公式进行粒径修正后,ADCP测量悬浮沉积物浓度的精度有较大幅度的提高。线性拟合的相关系数从0.65—0.71提高到0.78—0.88。由此看出,这一粒径修正模

型,不仅理论上可行,而且在现场实测中也得到了很好的验证。

致谢 英国威尔士大学海洋科学系 (School of Ocean Sciences, University of Wales, Bangor) 的 Jones S E 博士为本研究提供了相关原始数据,并对本研究工作中给予了指导和支持,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 汪亚平,高 抒等,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—563
- 吴加学,张叔英,任来法,2003. 长江河口北槽抛泥作业状态下的悬沙浓度分布与扩散过程. 海洋与湖沼,34(1): 83—93
- 程 鹏,高 抒,2001. ADCP 测量悬沙浓度的可行性分析与现场标定. 海洋与湖沼,32(2): 168—175
- Admiraal D M, Garcia M H, 2000. Laboratory measurement of suspended sediment concentration using an acoustic concentration profiler. *Experiments in Fluids*, 28: 116—127
- Alvarez L G, Jones S E, 2002. Factors influencing suspended sediment flux in the upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 747—759
- Clay C S, Medwin H, 1977. *Acoustical Oceanography*. New York, Wiley, 184—187
- Deines K L, 1999. Backscatter estimation using broadband Acoustic Doppler Current Profilers. *Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurements*, San Diego, CA, March 11—13, 1999, 249—253
- Downing A, Thorne P D, Vincent C E, 1995. Backscattering from a suspension in near field of a piston transducer. *J Acoust Soc Am.*, 97(3): 1614—1620
- Fisher F H, Simmons V P, 1977. Sound Absorption in Sea Water. *J Acoust Soc Am*, 62: 558—564
- Hay A E, 1991. Sound scattering from a particle-laden jet. *J Acoust Soc Am*, 90: 2055—2074
- Hay A E and Sheng J, 1992. Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter. *Journal of Geophysical Research*, 97 (C10): 15661—15667
- Hess F R, Bedford K W, 1985. Acoustic backscatter system (ABSS): The instrument and some preliminary results. *Marine Geology*, 66: 357—380
- Hill D C, Jones S E, Prandle D, 2003. Derivation of sediment resuspension rate from acoustic backscatter time-series in tidal waters. *Continental Shelf Research*, 23: 19—40
- Holdaway G P, Thorne P D, Flatt D *et al*, 1999. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 19: 421—441
- Jones S E, Jago C F, Prandle D *et al*, 1994. Suspended sediment dynamics: Measurement and modeling in the Dover Strait, *Mixing and Transport in the Environment*. Wiley, New York, 183—201
- 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 Soc Am*, 85(4): 1501—1511
- Lynch J F, 1985. Theoretical analysis of ABSS data for HEBBLE. *Marine Geology*, 66: 277—289
- Thorne P D, Vincent C E, Hardcastle P J *et al*, 1991. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, 98(1): 7—16
- Thorne P D, Campbell S C, 1992. Backscattering by a suspension of spheres. *J Acoust Soc Am*, 92(2): 976—986
- Thorne P D, Hanes D M, 2002. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, 22: 603—632
- Urick R J, 1983. *Principle of underwater sound*. McGraw-Hill Book Co, New York, 1—95

PARTICLE SIZE CORRECTION OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION MEASURED BY ADCP WITH IN-SITU PARTICLE SIZE ANALYZER

LAN Zhi-Gang, GONG De-Jun, YU Xin-Sheng, LI Si-Ren, XU Yong-Ping

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

Abstract Measurements of suspended sediment load are crucial to the study of dynamics of suspended sedi-

ment. Over last decade, much work has been carried out in exploring the potential of ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) to estimate SSC (Suspended Sediment Concentration), due to its commercial availability and widespread application in measuring current velocity. One of the great advantages of the ADCP is its capability of measurement throughout the whole water column for a long period and the combination of measurements of vertical profiles of fluid velocities and back scatter intensities. This method not only improves temporal and spatial resolutions of SSC estimates, which are essential to the study of suspended sediment dynamics, but also can directly evaluate profiles of suspended sediment flux, and hence transport from just one instrument. Analysis of acoustic backscatter data with suspended sediment concentrations, however, must take account of the fact that ADCP observation may represent concurrent changes in concentration and morphology of suspended sediment without discrimination. Detailed knowledge of the characteristics of the suspended sediment, therefore, is essential for obtaining an accurate measurement. Variable nature of sound scatterers and some other physical parameters in ocean makes it difficult for in-situ estimation of all relevant parameters to inverse acoustic back scatter signals to accurate measurements of suspended sediment concentration with high resolution. Accurate measurements can't be obtained without particle size correction due to particle size dependence of ABS (Acoustic Backscattering) measurement. Based on Rayleigh Scattering Theory, the equivalent particle radius as well as the calibration equation was derived for particle size correction of ABS. When the wavelength of incident sound is much greater than the diameter of scatters, Rayleigh scattering function applies, which means that the backscattering cross section is proportional to the fourth power of the scatter radius. Therefore, in the water where scatters are widely and randomly spaced, the backscattering cross section of the individuals simply adds to form the total backscattering cross section. Under the assumption that the scatters are homogeneous except their radius, the total backscattering intensity can be further simplified to be proportional to the sum of the third power of particle radius of every size band multiplied by its mass concentration. The volume concentration and particle size distribution can be obtained from in-situ particle size spectrum analyzer. With these data, we can defined an equivalent particle radius which could be used to correct ABS measured by ADCP to inverse SSC.

A series of field experiments were conducted respectively to help understand the acoustic measurements of SSC by ADCP and verify the correction scheme mentioned above in Liverpool Bay and coastal water of Anglesey, by deploying a 600kHz RDI ADCP near the seabed. Vertical profiles were obtained with a Sea-Bird CTD fitted with a LISST-100 and water sampling bottles. Water samples from CTD-mounted bottles were used to measure SSC by filtering a known volume of the water sample and by differential weighing of the dried filters, while the measurements from LISST100 were used to analyze PSD (Particle Size Distribution) of the suspended sediment and obtain equivalent particle radius for ABS correction. To secure an accurate inversion result, time average should be applied to ADCP echo intensities before further analysis to reduce the random fluctuation due to the random position of the suspended scatters within the ensonified region of the water. Data analysis of those field tests showed considerable improvements of the measurements after applying the particle size correction formula, with the correlation coefficients growing from 0.65—0.71 before the correction to 0.78—0.88 after the correction.

Key words ADCP, Suspended sediment concentration, Particle size correction, ABS