

# 声学光学法泥沙浓度观测的对比研究<sup>\*</sup>

胡 捷,徐继尚,牛建伟,董 平<sup>\*</sup>,秦宽宽

(中国海洋大学 海洋地球科学学院,山东 青岛 266100)

**摘 要:**根据光学后散射传感器(Optical Backscatter Sensor, OBS)和声学后散射传感器(Acoustic Backscattering Sensor, ABS)估算悬浮沉积物质量浓度(Suspended sediment concentration, SSC)的原理,在水槽实验室不同波况产生较高悬浮沉积物质量浓度的条件下运用 OBS 仪器 ASM-IV(激光边界层泥沙剖面仪)和 ABS 仪器 AQUAscatt1000(多频声学泥沙剖面仪)观测并记录数据。然后用水槽实验抽取的水样标定光学和声学仪器,反演得到高精度的垂向泥沙浓度分布剖面。结果表明, OBS 仪器 ASM-IV 上的不同光学探头测得的浊度与 SSC 可以用同一个线性关系描述,相关系数高达 0.996,进而能够高精度(垂向间距 1 cm)地反演垂向的 SSC 剖面;对于本组水槽实验的粉土底质和不同的波况而言,声学仪器比光学仪器的量测精度低;不同频率声学仪器换能器的量测值可相差几个数量级,不同波况条件下的声学仪器反演值与实测 SSC 的相关性系数在 0.716~0.974 变化。

**关键词:**连续 OBS;多频 ABS;SSC;垂向剖面

**中图分类号:** P733.2 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.01.005

海底沉积物或水体泥沙在多种外力作用下存在着再悬浮和沉降的动力过程,而能否准确测量泥沙或沉积物的相关参数对于评估海洋初级生产过程、港口航道的淤积、石油及通信管线安全、海上开发平台安全等涉及海底边界层泥沙输运过程有很大影响。海水中悬浮沉积物浓度是最基础而又关键的参数,因此对水体泥沙浓度的准确量化的研究,对于上述领域都具有一定的现实意义。

目前,研究悬浮沉积物质量浓度的方法主要有两类,即传统方法和现代方法<sup>[1]</sup>。传统方法是现场取水(三点或六点法),然后对水样进行抽滤、称重、计算悬沙质量浓度,该方法是最准确的方法,但仅能得到某几层深度、较大时间间隔的 SSC 数据。现代方法是利用光学与声学等传感器间接观测悬浮沉积物质量浓度,其特点是效率高,连续采集,范围广,可获得具有较高时空分辨率的 SSC 信息。光学法主要通过 OBS 实现,声学方法主要通过 ABS 实现。光学法通过接收红外辐射光的散射量监测悬浮物质,然后通过相关分析,

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-11-16

资助项目:国家自然科学基金项目——波浪水流联合作用下粉土海床液化和泥沙运动耦合动力过程(51479182)

作者简介:胡 捷(1990-),男,硕士研究生,主要从事河口海岸泥沙运动研究与应用。E-mail: 707651853@qq.com

<sup>\*</sup> 通讯作者:董 平(1958-),博士研究生导师,主要从事海洋泥沙动力运动过程、海岸动力地貌演变预报和海岸防护工程等领域方面的研究。E-mail: p.dong@dundee.ac.uk

(李 燕 编辑)

建立水体浊度与颗粒物质量浓度的相关关系,得到其他 SSC 值。声学法则通过测量水体从一定剖面由泥沙或其他悬浮颗粒反射回来的声学信号来反演计算 SSC。

自 1980 年以来,海洋学和水力学的研究者利用声学法和光学法对河口近底边界层的细颗粒泥沙过程进行了大量现场实验研究。Sternberg 等<sup>[2]</sup>通过采用 OBS 测定泥沙质量浓度研究了旧金山湾河口底部边界层的悬沙输移。Lyon 等<sup>[3]</sup>利用一个 3 MHz 的 ABS 装置观测了长岛海峡中部水下边界层底部 1 m 范围内的 SSC 垂线分布并以此进一步研究了水下边界层沉积动力过程。Hess 和 Bedford<sup>[4]</sup>介绍了一种自容式的 ABS 系统,并且利用该仪器成功获取了海洋底边界层(Benthic Boundary Layer, BBL)的悬浮颗粒质量浓度剖面数据。Szupiany 等<sup>[5]</sup>在河流环境下利用 ADCP 进行了大量的走航式 SSC 剖面测量。时钟和凌鸿烈<sup>[6]</sup>利用 ASSM 对长江口的悬沙进行了系统的研究,获得了在不同潮沙环境下的典型 SSC 剖面数据。汪亚平等<sup>[7]</sup>利用 300 kHz ADCP 在胶州湾等海域进行了走航式断面观测,获得测量 SSC 等。薛元忠等<sup>[8]</sup>对 OBS 的测量原理及校正进行了探讨。王元叶<sup>[9]</sup>和徐俊杰<sup>[10]</sup>利用光学和声学测量仪器组建了近底四角架观测系统,以长江口为主要研究区域,研究其近底水流结构特征和泥沙交换过程,并探讨了航道集中回淤机制。

然而,以往的研究很少见到用 OBS 观测垂向上连续的 SSC 剖面,多是用 1~4 个点式 OBS,测得上、中、下层位的悬浮物质量浓度。由于浓度变化不连续,无法准确推算沉降速度或者湍流等对悬浮物质量浓度变化的影响。声学法多是用单频声强信号反演 SSC,缺乏多频率之间的对比。更值得注意的是过去的研究往往只采用单一的光学法或者声学法,缺少将二者用于同一悬沙区域的对比研究。本研究采用先进的连续多点式 OBS 仪器和多频 ABS 仪器作为数据采集装置,在波浪条件可控、泥沙颗粒特性已知、多系统独立观测的室内水槽实验室环境中,结合传统的采水法,对 OBS 仪器进行标定,对 ABS 仪器的声强信号进行标定,然后得到这两种方法的 SSC 与采水抽滤的 SSC 之间的相关关系,并对最大和最小两种波况不同取水时间的垂向上的 SSC 剖面进行对比和分析,可为以后相关工程应用和科学研究提供一定的参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 室内水槽实验

实验所用的水槽由中国海洋大学海洋工程实验室提供,水槽尺寸长 60 m、宽 3 m、高 1.5 m,水槽底沙坑尺寸长 2.57 m、宽 2.77 m、深 0.50 m,相对于以往其他所用的水槽的尺寸,特别是宽度要大很多,减少了实验中的边壁影响。在沙坑上面仪器布设如图 1 所示。

OBS 仪器为德国 Argus 公司生产的 ASM-IV,基于嵌入到不锈钢(钛)杆当中的 OBS 进行工作,传感器每隔 1 cm 固定在一个放射板上,共 96 个探头;ABS 仪器为英国 Aquatec 公司 AQUAcat1000 泥沙浓度剖面仪,有 4 个可以收发高频声信号的换能器(1,2,4 和 0.5 MHz),4 个换能器均是垂直发射,可以用于监测底床与换能器之间水体中的悬浮颗粒的情况。仪器设置参数见表 1。

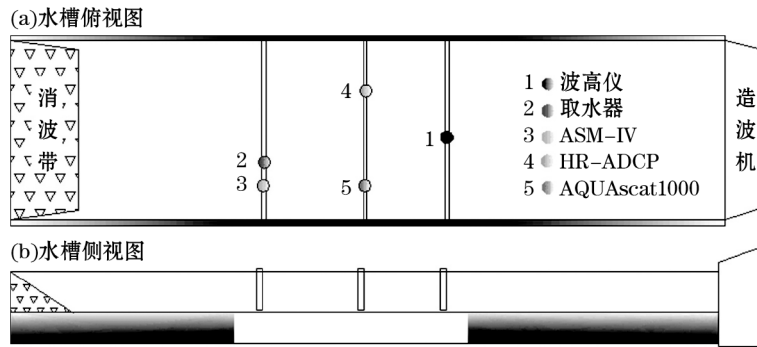


图 1 水槽实验仪器布置图

Fig.1 Instrument arrangement for the flume experiment

表 1 仪器设置参数表

Table 1 Parameter setting for the instruments

仪 器	距底高度/cm	采样频率/Hz	垂向测量分层间隔/cm	工作时间/min
ASM-IV	0	1	1	156
AQUAscat1000	38	8	1	156

本组水槽实验采用的粉土取自黄河口东营港,粉土中值粒径约为 37 μm。将粉土晒干过筛,加适量的水搅拌均匀,填入沙坑,高度与水槽底部平齐,在造波之前固结 9~10 d。实验水深 50 cm,波浪周期 T=1.5 s,波高由小到大(10,14 和 18 cm)依次加载,每次波浪持续作用时间约为 21 min。在每一波况条件下取 8 次水样,取水时间分别为:波浪开始 3,6,9,12,17 和 21 min,以及波浪停止后 3 和 6 min。

### 1.2 OBS 标定

Kineke 等<sup>[11]</sup>指出,SSC 与 OBS 输出值之间存在 3 个转换区:线性区、饱和区以及颗粒屏蔽区(如图 2 所示)。线性区 SSC 为 0~10 kg/m<sup>3</sup>;饱和区 SSC 为 10~30 kg/m<sup>3</sup>,当达到 20 kg/m<sup>3</sup>时,OBS 输出达到饱和,输出值也达到最大值;当 SSC 高达 30~300 kg/m<sup>3</sup>时,颗粒屏蔽效应占主导。

实测数据表明,在本次实验中 SSC 值是小于 10 kg/m<sup>3</sup>的,SSC 与浊度之间是属于线性关系的,所以应该采用线性区的响应曲线。用线性回归标定的方法可将 OBS 输出值(NTU)转化为 SSC 值:

$$SSC = AX + B, \tag{1}$$

式中,SSC 为悬浮泥沙浓度值;X 为 OBS 输出值(NTU);A、B 为回归系数。

ASM-IV 观测得到的数值是水体悬浮颗粒浊度值,需要经过标定才能得到实际 SSC。悬沙标定采用了标定池和水槽实验标定两种方法。标定池标定是先在标定池选定 2~3 个不同深度,固定软管,并计算出软管出水口对应的 ASM-IV 上对应的探头序号。然后

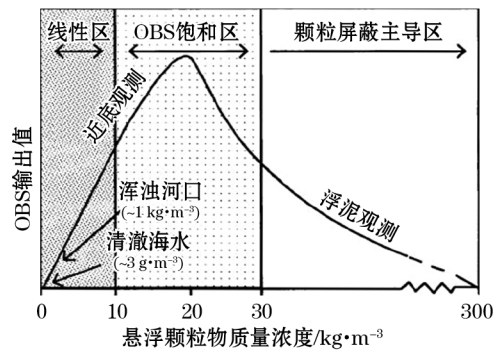


图 2 悬浮颗粒物质量浓度与 OBS 输出值的关系<sup>[11]</sup>

Fig.2 Relationship between the SSC and the OBS output<sup>[11]</sup>

在标定池内加入清水到预定水位,在把实验粉土分多次加入清水中,并不断搅动,SSC也相应逐渐由小变大直至搅拌均匀。将 ASM-IV(测量间隔为 1 s)放入标定池,探头发射板一侧对着取水软管口方向,开启记录。同时利用虹吸原理通过软管抽取一段时间的水样,记下开始结束时间,取出 ASM-IV。然后再加入适量粉土,搅拌均匀,重复上述步骤。通过抽滤实验计算得到悬浮沉积物质量浓度。

把得到的每一组的浊度算术平均值与相对应的每一组悬浮沉积物质量浓度值进行线性回归,得到 OBS 室内标定曲线。水槽实验标定是基于量测的波浪引起的悬沙,对每一次取水时间采集的水样 SSC 与 ASM-IV 现场同步记录的浊度数据进行相关性分析,从而得到水槽实验标定曲线。

### 1.3 ABS 直接校准

悬浮沉积物的声学测量原理是源散射强度的大小与散射水体中悬浮沉积物质量浓度的大小成正比(Thorne<sup>[11]</sup>)。声学仪器所发射的声波在水中传播时由于球面扩散以及介质吸收,会造成能量衰减,因此在计算源散射强度时,必须考虑声波的几何衰减和吸收衰减按式(2)进行修正(Urick<sup>[13]</sup>):

$$E_L = (E - E_r) + 20 \times \lg(R\phi) + 2\alpha_t R + C, \quad (2)$$

式中, $E_L$ 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不随时间变化,可以看作是常量。当声散射体物理特性也不随时空变时, $C$ 也可以看作常数。 $\alpha_t = \alpha_w + \alpha_s$ 为海水中总的声波吸收系数,式中  $\alpha_w$ 为海水对声波的吸收系数,可以由以下经验公式确定(Fisher 等<sup>[14]</sup>):

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

AQUAScat1000 观测得到的是不同频率(1,2,4 和 0.5 MHz)声学反向散射回波强度值,为了确定悬浮沉积物浓度,还需要每一种波况下的有效水样信息(水样质量浓度、水样距离探头的距离以及采取水样的时间)等。平均粒径、粒径分布曲线等粒径信息通过 Mastersizer3000 激光粒度仪分析水样获得,水样质量浓度通过抽滤实验获得。

## 2 结 果

### 2.1 ASM-IV 室内标定池和水槽实验标定结果

为了探究 ASM-IV 上不同光学探头的浊度值与 SSC 值之间相关关系的差异,分别选取了 52 号探头和 72 号探头进行标定实验。ASM-IV 的室内标定质量浓度和浊度的关系如图 3 所示。

结果表明,52 和 72 号探头的浊度值与 SSC 之间的相关性系数分别为  $R=0.9994$  和  $R=0.9956$ 。这些单个探头所测浊度值与 SSC 值之间存在很高的线性关系,表明 ASM-IV 的数据可以用来高精度地反演水体悬浮沉积物浓度。从图 3 还可以看出不同探头得到的浊度值与 SSC 值之间也存在很好的相关性,52 和 72 号探头浊度数据与 SSC 值整体相关性系数达到 0.9955。虽然不同的 OBS 光学探头在性能参数上可能存在细微差异,但每一件 ASN-IV 在出厂的时候都进行过专门的标定实验,各探头之间的输出值具有很好的 consistency。因此某一个探头的标定曲线即可用来确定其他探头浊度值和 SSC 值之间

的相关关系。

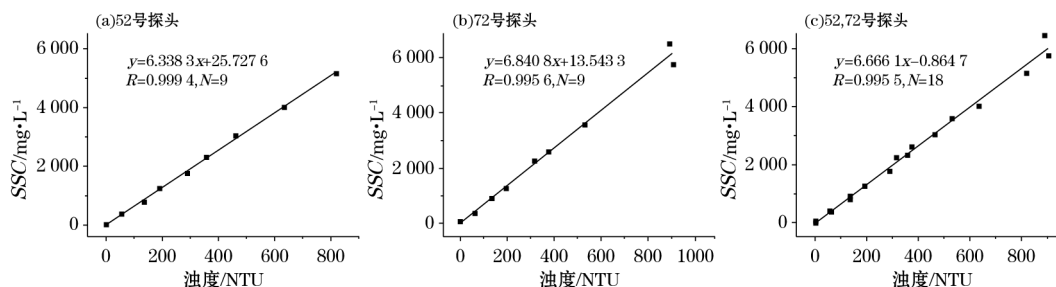


图 3 ASM-IV 室内标定池 52 号和 72 号探头浊度与 SSC 线性拟合曲线

Fig. 3 Linear fitting curve between the turbidity and the SSC measured with No. 52 and No. 72 probes of ASM-IV in the calibration pool of the lab

水槽实验 ASM-IV 测得的浊度值标定结果如图 4 所示,浊度值与 SSC 的线性关系式:

$$SSC = 4.4706X - 0.7094, \quad (5)$$

式中, X 为浊度。

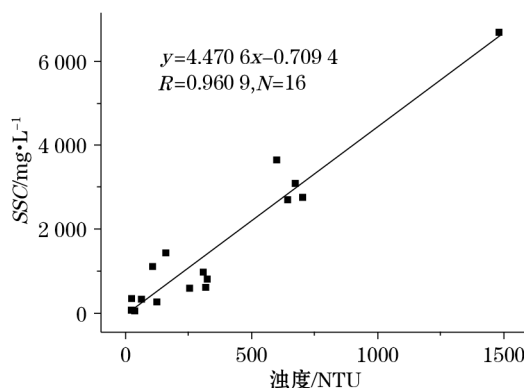


图 4 ASM-IV 水槽实验标定曲线

Fig. 4 The calibration curve for ASM-IV in the flume experiment

## 2.2 AQUAscatter1000 标定结果

水样的泥沙信息在声强反演 SSC 中必不可少。为此对实验的 3 种波况,分别取了在波浪作用过程中的 3 个典型水样进行抽滤实验、激光粒度实验和相关计算,得到主要参数如表 2 所示。

表 2 水样相关参数

Table 2 Parameters related to the water samples

	10 cm 波况	14 cm 波况	18 cm 波况
粒径范围/ $\mu\text{m}$	1~144	1~186	1~160
平均粒径/ $\mu\text{m}$	39.5	38.0	36.0
粒径分布类型	对数正态分布	对数正态分布	对数正态分布
粒径分布偏态	0.36	0.30	0.34



为了便于表述,将其4个频率换能器分别编号为I,II,III和IV,I(3)和I(1)分别代表I号换能器在取水样高度上下3cm范围内(3层数据)平均浓度值和I号换能器在取水样高度1cm范围(1层数据)内平均浓度值。对3种波况下4个换能器接收的声强信号,进行直接校准,得到的浓度值,与水槽实验实测浓度值进行相关度计算,结果见表3。

表3 AQUAscat1000 声强直接反演结果

Table 3 The results inverted directly from the sound intensity of AQUAscat1000

波高/cm		I(3)	I(1)	II(3)	II(1)	III(3)	III(1)	IV(3)	IV(1)
10	Pearson 相关性	0.831	0.715	0.822	0.827	0.776	0.758	/	/
	显著性(双侧)	0.041	0.110	0.045	0.042	0.070	0.081	/	/
	样本数 N	6	6	6	6	6	6	6	6
14	Pearson 相关性	0.716	0.632	0.721	0.256	0.325	0.219	/	/
	显著性(双侧)	0.174	0.253	0.106	0.624	0.530	0.676	/	/
	样本数 N	5	5	6	6	6	6	6	6
18	Pearson 相关性	0.974	0.976	0.887	0.875	0.733	0.723	/	/
	显著性(双侧)	0.005	0.004	0.045	0.052	0.159	0.168	/	/
	样本数 N	5	5	5	5	5	5	5	5
全部波况	Pearson 相关性	0.931	0.930	0.762	0.783	0.289	0.329	/	/
	显著性(双侧)	0	0	0	0	0.260	0.197	/	/
	样本数 N	16	16	17	17	17	17	17	17

注:“/”处表示无数据

对于结果中IV号换能器处理得到的悬浮沉积物质量浓度数据,在10cm波高条件下数量级为 $10^{-4}$ g/L,在14cm波高条件下数量级为 $10^{-9}$ g/L,在18cm波高条件下数量级为1g/L,数据波动范围过大,不适合用来作线性回归分析,因此IV号换能器(0.5MHz)频率不能用来反演本组实验条件下的SSC值。通过表中的其它数据还可以得出如下结论:

1)在较高SSC(最大可达10g/L)环境条件下,I号换能器(1MHz)的得到的悬浮沉积物质量浓度值是这4个频率换能器中最好的,相关性系数在0.716~0.974,总体相关性系数为0.926。

2)对于在处理声学反演数据与实测SSC值时,除了18cm波高条件下I(3)与实测SSC值相关性系数略小于I(1),其他10,14和18cm波高条件下I(3),II(3)和III(3)与实测SSC值的相关系数均大于I(1),II(1)和III(1)。因此在做AQUAscat1000声强反演SSC值线性回归曲线时仅需要在取水口附近上下3cm(3层)的数据取个平均值,原因是取水器入口的直径为1cm,但抽取的水样可以来自其附近上下层的水体。

3)基于以上分析,取I(3)的声强反演SSC数据和实测SSC进行了对比,如图5所示。通过线性回归拟合的两者关系线为:

$$\text{实测SSC} = 0.3643 \cdot \text{I(3)SSC} + 0.2676. \quad (6)$$

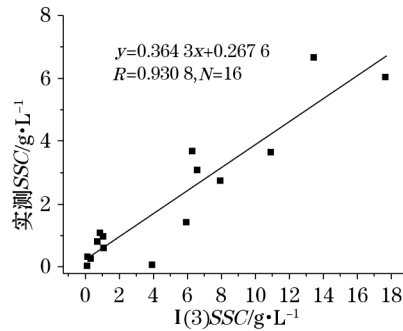


图 5 实测 SSC 与 I(3)反演 SSC 值的线性拟合曲线

Fig. 5 The linear fitting curve between the measured and the I(3) inverted SSC values

### 2.3 OBS 和 ABS 所测的垂向浓度剖面对比

水槽实验静止水深为 50 cm,声学仪器的安装高度是距底 38 cm,减去声学仪器探头的盲区 5 cm 后每个垂向上的剖面为底床到距底床 33 cm 的区域,为了便于对比,OBS 数据也选取底床到距底床 33 cm 的区域。

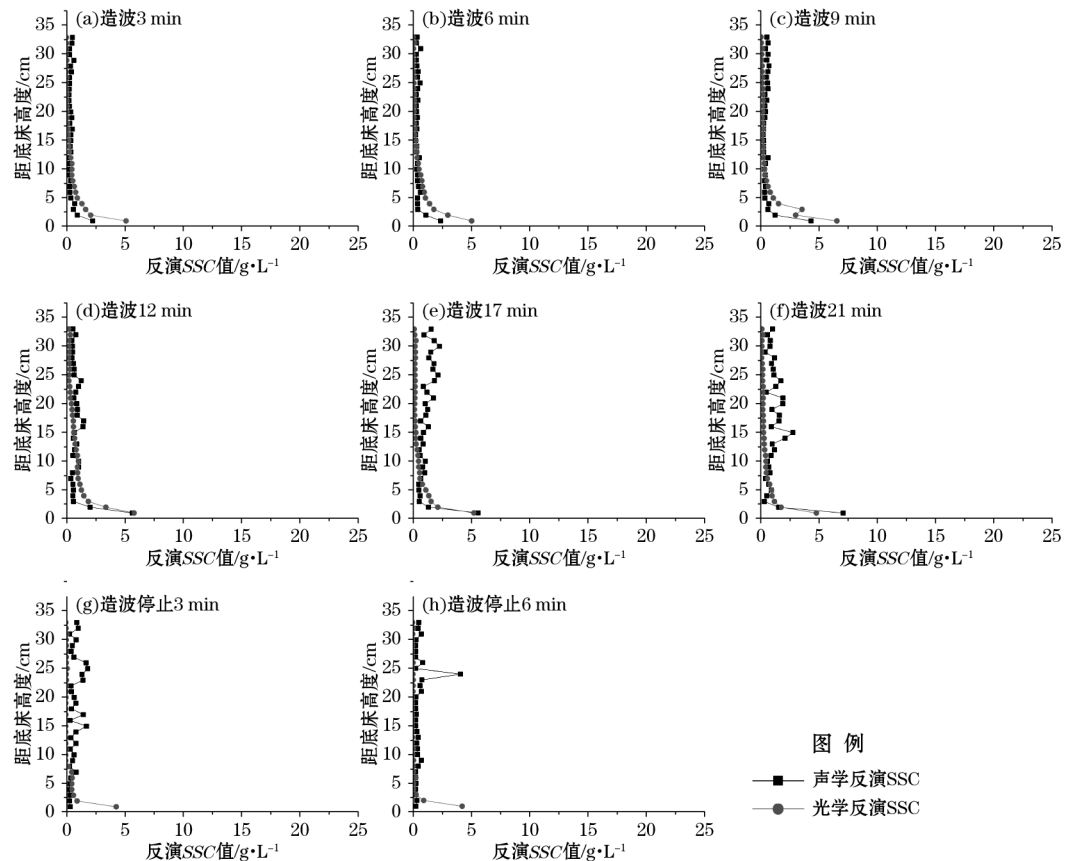


图 6 10 cm 波况条件下 8 个取水时间内 OBS 和 ABS 反演的垂向 SSC 剖面

Fig. 6 Eight vertical SSC profiles inverted by using the ABS and the OBS data obtained under the condition of a 10 cm wave height

选取 10 和 18 cm 波高条件下的全部取水时间点(共 16 个)所对应的 OBS 和 ABS 数据,反演出垂向上的 SSC 剖面,如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出在垂向上 SSC 大体上是呈近底高,往上递减的趋势,而且近底层的浓度梯度比上部水体要大得多,说明两种方法都可以反映 SSC 垂向分布的大体规律。

从图 6 可以看出据底床 1 cm 的 SSC 值最大可达 6.6 g/L, OBS 与 ABS 反演的 SSC 值在垂向上普遍有 1~2 个交点,在造波 3, 6, 9 和 12 min 以及在造波停止 3 和 6 min, 有一个交点,大致在距底床 10 cm 处,在交点以上部分 ABS 反演 SSC 值比 OBS 反演浓度值大,在交点以下部分则相反;在造波 17 和 21 min, 有两个交点,大致在距底床 6 cm 处和距底床 1 cm 处,在距底床 6 cm 以上 ABS 反演的 SSC 值大于 OBS 反演值,在底床 1~6 cm, ABS 反演的 SSC 值小于 OBS 反演值,在距底 1 cm 处 ABS 反演的 SSC 值又大于 OBS 反演浓度值。从图中还可以看出声学仪器反演得到的结果比光学反演结果明显离散,而且会有一些突变值。

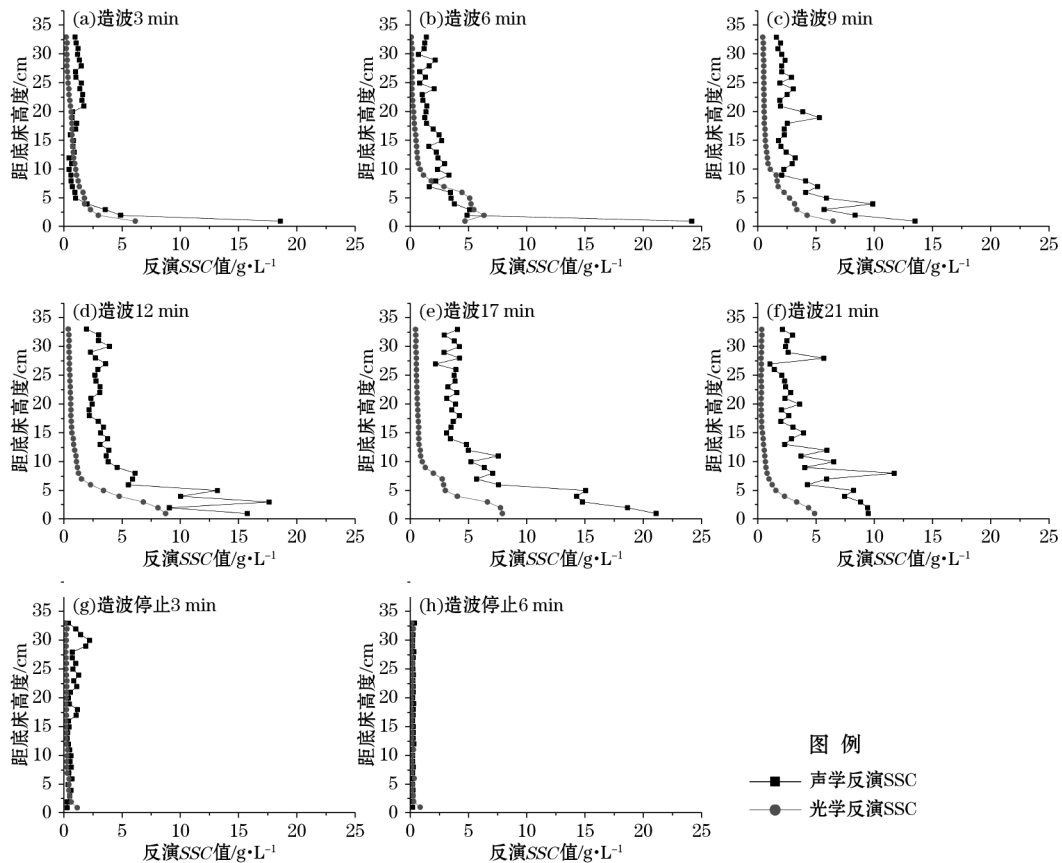


图 7 18 cm 波高条件下 8 个取水时间内 OBS 和 ABS 反演的垂向 SSC 剖面

Fig. 7 Eight vertical SSC profiles inverted by using the OBS and the ABS data obtained under the condition of a 18 cm wave height



从图 7 可以看出在 18 cm 波况条件下,距底床 1 cm 处的 SSC 值最大可达 9 g/L,在造波 3 min 时,靠近底床 4~12 cm ABS 反演的 SSC 值小于 OBS 反演值,其他位置 ABS 反演的 SSC 值大于 OBS 反演值;在造波 6 min 时,靠近底床 3~6 cm ABS 反演的 SSC 值小于 OBS 反演值,比造波 3 min 时的这一区域要小很多;在造波 9,12,17 和 21 min,在整个垂向剖面上 ABS 反演的 SSC 值均大于 OBS 反演值;造波停止后 3 min,两种方法反演 SSC 值大致在 4 cm 处有个交点,交点以上部分 ABS 反演的 SSC 值大于 OBS 反演值,交点以下则相反;造波停止后 6 min,除了最靠近底层数据差异较大以外,其他数据均比较接近。

对于在比较高悬浮沉积物质量浓度的环境下如何准确地得到声学反演的 SSC 一直是个公认的难题。本文的主要目的是通过 OBS 和 ABS 两种测量悬浮沉积物质量浓度仪器,在各自率定的基础上,在实验室量测不同波高条件下的悬浮沉积物质量浓度,给出了不同波高条件下实验水槽断面垂线悬浮沉积物质量浓度剖面,并对基于不同原理(光学和声学)的两种测量仪器的测量结果进行了初步的对比。至于 ABS 反演结果为什么抖动大,这需从水声原理以及能量耗散等方面做进一步地深入研究。

对比以及总结以上 2 种波况条件下 ABS 反演的 SSC 值与 OBS 反演质量浓度值的关系,可以得出以下结论:

1) 在水动力条件比较弱、波浪作用时间比较短的情况下,ABS 反演的 SSC 值与 OBS 反演 SSC 值比较接近;

2) 对比波高 10 和 18 cm 两种情况,在水体中 SSC 整体较小(小于 1 g/L,浊度值 240 NTU)的情况下,两种方法得到的 SSC 值相对比较接近;

3) 波浪作用时间越长,波高越大的情况下 ABS 反演 SSC 值与 OBS 反演值相差越大,其原因可能是波浪作用强烈导致水体中 SSC 变大。在实际操作中,在浓度梯度以及 SSC 较大的水体中不同层位多取几个标定水样,对这一区域的 OBS,特别是 ABS 数据进行单独处理,或者对相关的声学算法进行改进。

### 3 结 论

本次实验在不同波况、较高 SSC(实测最高可达 9 g/L)的条件下,通过连续多点式 OBS 仪器(ASM-IV)和多频 ABS 仪器(AQUAScat1000)对 SSC 进行小范围高精度的观测研究,得出如下结论:

1) OBS 仪器 ASM-IV 上的不同光学探头的浊度与 SSC 可以共用同一个线性相关关系;在水槽实验中,OBS 的浊度值与实测 SSC 值的相关系数为 0.960 9,略低于室内标定池中测定的相关性系数 0.996,但依然很高,能够高精度地反演垂向 SSC 剖面。

2) 在采用的实验粉土以及波况条件下,ABS 仪器的 4 个频率换能器中,1 MHz 的换能器所测得的声强数据反演浓度值与实测 SSC 值相关性最好,总体相关系数约为 0.93;0.5 MHz 的换能器所测得的声强数据反演浓度值与实测 SSC 值相差非常大,相差几个数量级。

3) 在对 ABS 反演的 SSC 值与 OBS 反演值的垂向悬浮沉积物质量浓度剖面进行对比时发现:只有在水动力条件比较弱、波浪作用时间比较短的情况下,ABS 反演的 SSC 值与

OBS 反演 SSC 值比较接近;反之,ABS 反演结果比 OBS 结果大,且比较离散。

#### 参考文献:

- [1] 魏晓,汪亚平,杨旻,等. 浅海 SSC 观测方法的对比研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,2013,(1): 161-170.
- [2] STERNBERG R W, KRANCK K, CACCHIONE D A, et al. Suspended sediment transport under estuarine tidal channel conditions[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 57(3-4):257-272.
- [3] LYON J G, BEDFORD K W, YEN C J J, et al. Determinations of suspended sediment concentrations from multiple day land sat and AVHRR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(1): 107-115.
- [4] HESS F R, BEDFORD K W. Acoustic backscatter system (ABSS): The instrument and some preliminary results[J]. *Marine Geology*, 1985, 66(1): 357-379.
- [5] SZUPIANY R N, AMSLER M L, PARSONS D R, et al. Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5):641-648.
- [6] 时钟,凌鸿烈. 长江口细颗粒悬沙浓度垂向分布[J]. 泥沙研究,1999,(2):59-64.
- [7] 汪亚平,高抒,李坤业. 用 ADCP 进行走航式 SSC 测量的初步研究[J]. 海洋与湖沼,1999,30(6): 758-763.
- [8] 薛元忠,何青,王元叶. OBS 浊度计测量泥沙浓度的方法与实践研究[J]. 泥沙研究,2004,(4):56-60.
- [9] 王元叶. 细颗粒泥沙近底边界层观测和模型研究[D]. 上海:华东师范大学,2007.
- [10] 徐俊杰. 基于底边界层研究的航道回淤机制分析[D]. 上海:华东师范大学,2009.
- [11] KINEKE G C, STERNBERG R W. Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor[J]. *Marine Geology*, 1992, 108(3-4):253-258.
- [12] THORNE P D, VINCENT C E, HARDCASTLE P J, et al. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices[J]. *Marine Geology*, 1991, 98(1):7-16.
- [13] URICK R J. Principle of underwater sound [M]. New York:McGraw Hill Book Company,1983.
- [14] FISHER F H, SIMMONS V P. Sound absorption in sea water[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, 61(Supp. 1): 558-564.

## A Comparative Study of Suspended Sediment Concentrations Observed With Acoustic and Optical Methods

HU Jie, XU Ji-shang, NIU Jian-wei, DONG ping, QIN Kuan-kuan

(College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Based on the principle of the estimation of suspended sediment concentration (SSC) by using optical backscatter sensor(OBS) and acoustic backscatter sensor(ABS), the suspended sediment concentrations have been measured and recorded by using OBS instrument ASM-IV and ABS instrument AQUAscatt1000 under the conditions of high sediment concentration and different wave conditions in a water flume lab. Both the OBS and the ABS measurements are first calibrated with the water samples collected during the water flume experiments and then inverted to obtain the vertical SSC profiles with high accuracy. The results show that the turbidity and the SSC determined with different optical probes of ASM-IV can be described with the same linear relationship, with a correlation coefficient being as high as 0.996, indicating that the vertical SSC profile can possibly be inverted with a high accuracy (vertical interval 1cm). For the silty bottom and wave conditions in the present flume experiment, the detection accuracy is lower with the ABS instrument than with the OBS instrument. The values measured by using the acoustic transducers with different frequencies can vary over several orders of magnitude, and the correlation coefficients between the inverted and the measured SSC values vary from 0.716 to 0.974.

**Key words:** multi OBS array; multi-frequency ABS; SSC; vertical SSC profile