

技术报告

# 应用声、光学仪器原位观测海底浮泥层 动态变化的对比研究\*

刘晓磊<sup>1,2</sup>, 马路宽<sup>1</sup>, 张红<sup>1</sup>, 陆杨<sup>1</sup>, 陈安铎<sup>1</sup>, 张淑玉<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 海底浮泥层动态变化是研究海底沉积物输运及地形地貌演变的重要内容。针对浮泥层关键特征参数(悬浮泥沙浓度、上下界面),目前国际上主要采用声学 and 光学仪器进行观测,但不同仪器受限于观测原理,适用范围存在一定的局限性。通过潮滩试验,模拟浮泥层动态变化过程,对比不同仪器观测悬浮泥沙浓度和海床界面高程的效果。结果显示,在较低悬浮泥沙浓度( $<10\text{ g/L}$ )情况下,高密度悬沙浓度剖面仪 ASM、声学多普勒流速仪 ADV 与声学多普勒流速剖面仪 ADP 均能完成悬浮泥沙浓度的观测要求,声学蚀积仪 AA400 与 ASM 均能得到准确的海床高程。在悬沙浓度较高的情况下( $>20\text{ g/L}$ ),声衰减显著,ADP 相对于 ASM 的误差最高可达 30.95%,难以准确测量水体悬沙浓度;随着悬沙浓度的升高( $>30\text{ g/L}$ ),AA400 无法得到连续有效的海床界面位置,ASM 也超出测量量程,因此,30 g/L 的悬沙浓度可作为风暴过程中高浓度浮泥层形成的标志。在现场复杂海况下开展海底浮泥层动态变化研究需要多种仪器相互配合。

**关键词:** 海底浮泥层;声学;光学;悬浮泥沙浓度;海床界面

**中图法分类号:** O441

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-5174(2021)01-086-08

**DOI:** 10.16441/j.cnki.hdxh.20200074

**引用格式:** 刘晓磊,马路宽,张红,等.应用声、光学仪器原位观测海底浮泥层动态变化的对比研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(1):86-93.

LIU Xiao-Lei, MA Lu-Kuan, ZHANG Hong, et al. Comparative study of in-situ observation of dynamics of fluid mud layers on the seafloor with acoustic and optical instruments[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(1): 86-93.

海底浮泥层是一种高浓度沉积物流体层,广泛存在于海底表面,主要由细颗粒沉积物(黏土和粉土)与水混合而成,与上层含沙水体与下层固结海床之间具有相对明显的分界面。浮泥层沉积物浓度较高,在重力作用下形成的重力流是细颗粒沉积物跨大陆架输运的重要机制<sup>[1-2]</sup>。此外,风暴作用会诱发大范围浮泥层形成<sup>[3]</sup>,其沿斜坡运动对海底工程设施威胁巨大。因此,研究浮泥层的形成与运动过程,对了解泥沙输运过程、海底地形地貌演变过程以及工程选址等具有重大意义。由于真实海洋环境复杂多变,对海底浮泥层动态变化过程进行研究,主要依赖现场原位观测方法。

在进行海底浮泥层判定时,国际上普遍将悬浮泥沙浓度 10 g/L 定义为浮泥层的浓度下限,将悬浮泥沙浓度达到 10 g/L 的水体定义为浮泥层上界面,海床位置处为浮泥层下界面<sup>[4-5]</sup>。自 1980 年代以来,随着声学

和光学传感器技术的快速发展,国内外学者陆续针对浮泥层动态变化开展了现场原位观测。Ogston 等<sup>[6]</sup>使用了搭载光学后向散射传感器 OBS 的观测系统,于 1996 年冬季风暴期间在加利福尼亚北部陆架观测到了浮泥层形成,并在重力作用下形成重力流向海运动的过程。Hale 等<sup>[3]</sup>使用声学后向散射传感器 ABS 于 2010 年在新西兰 Waipaoa 河沿岸陆架测得浮泥层的悬浮泥沙浓度剖面,并测得近底悬浮泥沙浓度达到 50 g/L。不同仪器受限于观测原理,存在测量量程、测量范围、测量精度、是否扰动观测点等方面的局限性,无法保证整个观测过程均符合仪器的观测要求,需要使用不同仪器对测量结果进行对比,提高原位观测数据的准确性。

本文通过现场潮滩试验模拟海底浮泥层的动态变化过程,采用 4 种国际主流的声学 and 光学仪器对浮泥

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(41877221);山东省自然科学基金项目(ZR2019QD001);青岛海洋科学与技术试点国家实验室开放基金项目(QNLM20160RP0110)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(41877221);the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2019QD001);the Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology Foundation(QNLM20160RP0110)

收稿日期:2020-02-10;修订日期:2020-04-12

作者简介:刘晓磊(1985-),男,副教授,主要从事海洋工程地质与环境相关教学与科研工作。E-mail: xiaolei@ouc.edu.cn

层要素进行分析对比,探讨不同仪器的时空分辨率、准确度、影响因素与适用范围,为浮泥层动态变化过程现场原位观测、海底沉积物运输与地形地貌演变研究提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验仪器及原理

**1.1.1 高密度悬沙浓度剖面仪 ASM** 光学方法测量悬浮泥沙浓度是目前常用的现场观测方法。光学后向散射传感器 OBS(Optical Back Scattering)广泛用于悬浮物浓度研究<sup>[7-8]</sup>。其工作原理是向水体发射光束,光束由于水体中悬浮物作用发生散射,通过接收后向散射信号得到水体浊度。OBS 测量的浊度能达到较高的精度,适用于现场原位观测<sup>[9]</sup>。高密度悬沙浓度剖面仪 ASM(Argue Surface Meter)测量原理与 OBS 相同,测量结果也与 OBS 具有很好的一致性<sup>[10]</sup>。本文采用德国 Argus 公司生产的 ASM-IV 探杆,其集成了 144 个 OBS 传感器,传感器间隔为 1 cm,采集频率 0.2 Hz,量程为 0~4 000 FTU,适用水深 100 m,可有效测量浊度剖面随时间的变化。

**1.1.2 声学多普勒流速仪 ADV/ADP** 声学多普勒流速仪 ADV(Acoustic Doppler Velocimetry)与声学多普勒流速剖面仪 ADP(Acoustic Doppler Profilers)是目前水力及海洋实验室的标准流速测量仪器。使用声学后向散射来测量颗粒浓度的方法已经被广泛地应用于泥沙动力过程的研究<sup>[11-12]</sup>。本文采用的 ADV 与 ADP 产自挪威 Nortek 公司,能向水体中发射 0.4~2.0 MHz 的声波并接收声散射信号,ADV 采集频率范围为 1~64 Hz,ADP 采集频率最高为 1 Hz,适用水深 500 m。从现场观测数据中,可以提取有关水体悬浮颗粒物信息,经过校正后可得测量点的悬浮泥沙浓度。

**1.1.3 声学蚀积仪 AA400** 声学测深仪器通过发射

器向海床方向发射一定频率的声波,声波在接触声学最大反射面(即海床界面)反射后被接收器接收,通过计算声波传播速度和时间,得到发射器相对于海床界面的高程。本文采用韩国 EOFE 公司生产的声学蚀积仪 AA400,可发射 450 kHz 超声波,可以垂直向下固定于四脚架进行海床高程测量,采集频率 0.2 Hz,测量精度为 1 mm,适用水深为 100 m。

### 1.2 试验方法及过程

2019 年 7 月 22~30 日,于东营市 401 采油平台附近潮滩进行试验(见图 1(a))。潮滩沉积物由黄河携带入海泥沙沉积形成,与黄河口形成的海底浮泥层具有相同的物质来源<sup>[13]</sup>,该处沉积物的粉粒含量为 60.2%,黏粒含量为 15.4%,平均粒径为 0.029 mm。退潮时潮滩外露,便于现场观测仪器布放与回收,能更好地进行海底浮泥层动态变化过程观测。

在原始潮滩开挖一个长 200 cm,宽 60 cm,深 80 cm 的试坑,底部模拟原始海床。将光学悬沙剖面仪 ASM、声学多普勒流速剖面仪 ADP、声学多普勒流速仪 ADV、声学蚀积仪 AA400 使用观测架固定,放置于试坑一端,另一端放置造波装置进行造波(见图 1(b))。仪器布放完毕后,选取潮滩土配置泥浆倒入试坑中,待仪器与水体稳定开始观测浮泥沉降过程,该过程用于比较在浮泥层存在的情况下不同仪器对悬浮泥沙浓度以及海床界面的响应,共持续 30 min。待沉降完毕,使用试坑另一端的造波装置进行造波,造波过程持续 30 min,观测并比较在波浪影响下,沉积物再悬浮过程中各仪器对海床界面变化的响应。其中光学悬沙剖面仪 ASM 与声学蚀积仪 AA400 每 5 s 分别测一次浊度剖面和海床高程,ADP 采集频率 1 Hz,ADV 采用高频采集,采集频率 16 Hz。试验结束后得到了随时间变化的水体浊度剖面(ASM),单点声后向散射强度(ADV),声后向散射强度剖面(ADP),以及海床界面高程(AA400)。

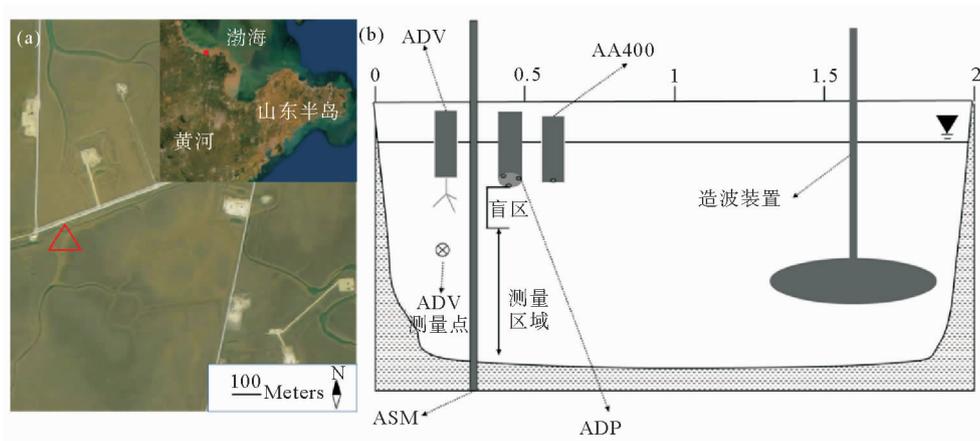


图 1 潮滩试验场地俯视图(a)及试验布置图(b)

Fig.1 Top view of tidal flat test site (a) and test device (b)

## 2 试验结果

### 2.1 悬浮泥沙浓度观测

观测悬浮泥沙浓度(SSC)可使用光学悬沙剖面仪ASM直接得出浊度剖面,也可以使用声学多普勒流速仪ADV/ADP得到声后向散射强度,从而转换为悬浮泥沙浓度数据。

根据声后向散射的原理,在悬沙浓度较低的情况下(一般小于10 g/L),声后向散射强度(dB)正比于悬浮泥沙浓度<sup>[14]</sup>(g/L),两者的对应关系为:

$$\log_{10}(\text{SSC})=aS_V+b \quad (1)$$

式中系数 $a$ 、 $b$ 为常数,本次潮滩实验未取得实时水样,因此使用ASM所测悬浮泥沙浓度来校准ADV和ADP。采用线性回归分析方法,建立声后向散射强度和悬浮泥沙浓度相关关系,从而将声学仪器测得的声后向散射强度转换为悬浮泥沙浓度。

图2为潮滩实验沉降过程中由ASM测量的水体浊度,并根据仪器自身的校正得到的悬浮泥沙浓度剖面<sup>[15]</sup>。从图2中可以得到沉降过程下部悬浮沉积物浓度高于上部,并随着时间推移,上部水体中悬浮沉积物浓度逐步降低,代表浮泥层的沉降过程。

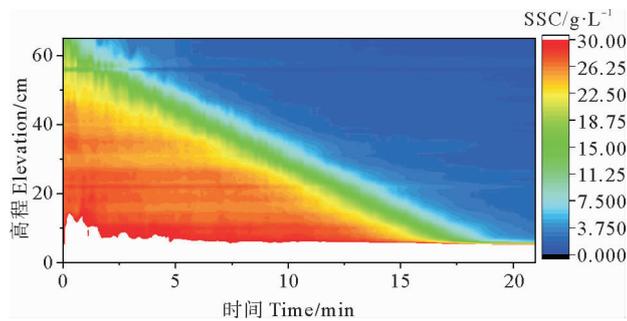


图2 沉降过程ASM所得悬浮泥沙浓度剖面

Fig.2 Suspended sediment concentration profile obtained by ASM during the settlement process

ADV探头距离海床底部50 cm,其仪器本身具有15 cm的盲区,因此ADV所测数据为距离海床35 cm处的声后向散射强度 $S_V$ 。使用对应高度处ASM的OBS探头所得到的输出值浊度来校准声后向散射强度数据。以ASM所测SSC为标准,可将声后向散射数据分为三部分:在SSC小于10 g/L的情况下,浊度与声后向散射强度具有显著的线性关系(见图3(a)),拟合相关性 $R^2$ 等于0.92;在SSC大于10 g/L小于20 g/L的情况下,两者的相关性减小(见图3(b)), $R^2$ 等于0.67。当SSC大于20 g/L时,悬浮沉积物浓度过高,声后向散射强度无法准确有效反应沉积物浓度的变化。

根据拟合结果得到声后向散射强度 $S_V$ 与悬浮泥沙浓度之间的关系,对比ADV和ASM对悬浮泥沙浓度的响应(见图3(c))。发现当SSC大于20 g/L时,使用校准关系得到的ADV反演值与ASM实测值具有较大差距。在SSC小于20 g/L的范围内,ASM实测值与ADV反演值具有相似的变化趋势。当SSC大于6 g/L时,ADV反演值在实测值上下波动,最终当SSC小于3 g/L时,两者趋于相等。

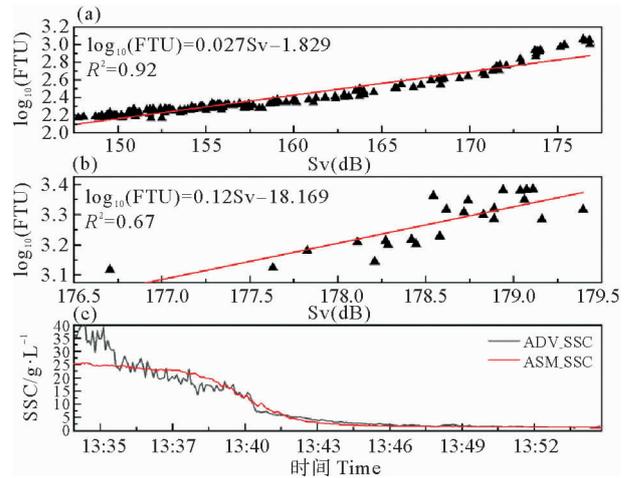


图3 不同SSC范围内ADV声后向散射强度 $S_V$ 与 $\log_{10}$ (浊度)拟合曲线(a)~(b)及ADV与ASM对应OBS探头观测悬浮泥沙浓度(SSC)结果对比(c)

Fig.3 The fitting curve of ADV backscatter intensity  $S_V$  and  $\log_{10}$ (turbidity) in different SSC ranges (a)~(b) and comparison of suspended sediment concentration (SSC) observed by ADV and ASM (c)

ADP和ADV具有相同的原理,使用相同的方法对ADP所测得第一层的声后向散射强度和对应ASM的OBS探头所测数据进行拟合(见图4(a),(b)),得到ADP与ASM对悬浮泥沙浓度的响应对比(见图4(c))。拟合后相关性 $R^2$ 分别等于0.92与0.85,拟合效果良好。根据图4发现,当SSC大于20 g/L时,ADP反演值与ASM实测值具有较大差距。在SSC小于20 g/L的范围内,ADP和ASM观测数据的关系与ADV和ASM观测数据的关系具有相似性,同样具有同步的趋势变化,当SSC大于4 g/L时,ADP反演值在ASM实测值上下波动,最终当SSC小于3 g/L时,两者趋于相等。

对于整个剖面的声后向散射强度数据,去除代表海床的异常值及以下区域,得到水体范围内的声后向散射强度,若将拟合关系运用到整个剖面,可以得到ADP所测的随时间变化的悬浮泥沙浓度剖面(见图5)。通过与ASM的实测悬浮泥沙浓度剖面(见图2)进行对比,发现在趋势上两者相同,但是在靠近海床位置

处两者具有较大差距。由于该过程是一个沉降过程, 因此显然 ASM 所测泥沙浓度剖面更加准确, 简单地拟合关系运用到整个 ADP 所测剖面是不准确的。

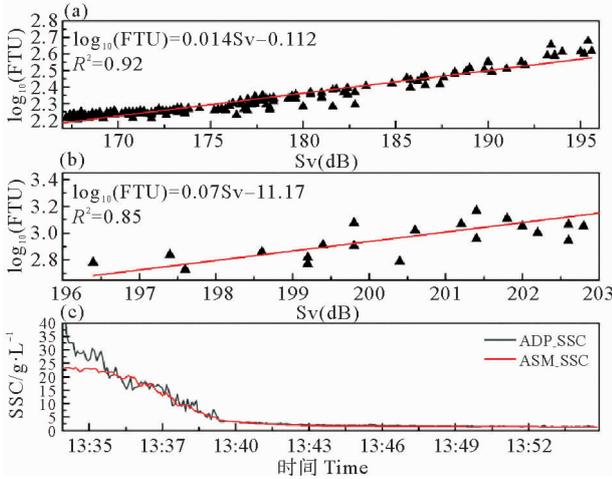


图 4 不同 SSC 范围内 ADP 声后向散射强度 Sv 与  $\log_{10}$ (浊度)拟合曲线(a)~(b)及 ADP 与 ASM 对应 OBS 探头观测悬浮泥沙浓度(SSC)结果对比(c)  
Fig.4 The fitting curve of ADP backscatter intensity Sv and  $\log_{10}$ (turbidity) in different SSC ranges (a)~(b) and comparison of suspended sediment concentration (SSC) observed by ADP and ASM (c)

为了提高 ADP 观测悬浮泥沙浓度的准确性, 并发挥 ADP 能测量剖面的优点, 对整个声后向散射强度剖面的多个层与 ASM 所测悬浮泥沙浓度剖面进行拟合, 分析 ADP 对于各个分层的悬浮泥沙浓度测量准确性。

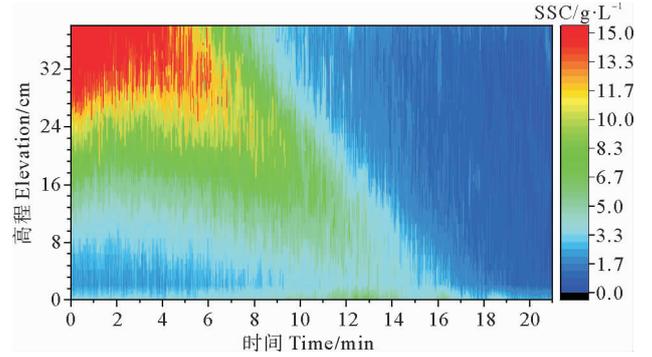
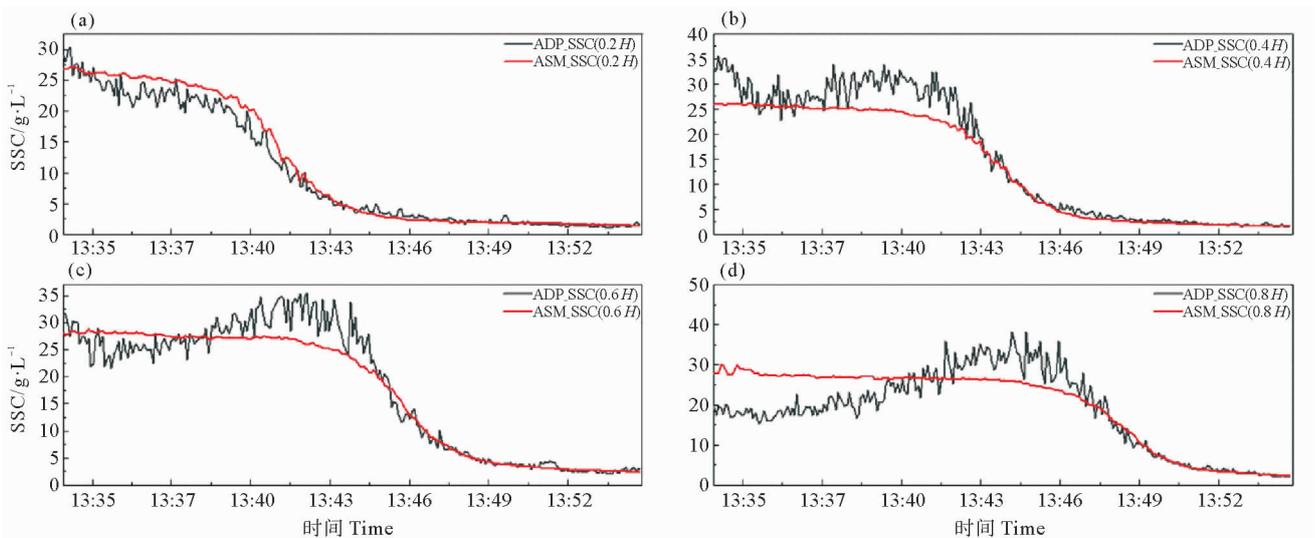


图 5 沉降过程 ADP 所得悬浮泥沙浓度剖面  
Fig.5 Suspended sediment concentration profile obtained by ADP during the settlement process

对 ADP 所测声后向散射强度使用六点法进行进一步的校正, 将 ADP 所测有效剖面高度设为  $H$ , 分别将  $0 H$ 、 $0.2 H$ 、 $0.4 H$ 、 $0.6 H$ 、 $0.8 H$ 、 $H$  六处高度的声后向散射强度与其对应高度的 OBS 探头所测浊度进行拟合, 图 6 展示了沉降阶段  $0.2 H$ 、 $0.4 H$ 、 $0.6 H$ 、 $0.8 H$  四处高度两种仪器的对比, 表 1 展示了沉降阶段前期(13:40 之前)和沉降阶段后期(13:46 之后)四处高度 ADP 所测悬浮泥沙浓度相对于 ASM 所测数据的相对误差。发现在沉降阶段前期, 上部水体悬浮泥沙浓度较大, ADP 所测得各水深的悬浮泥沙浓度与 ASM 所测数据差距较大。在沉降阶段后期, 水体中悬浮泥沙浓度下降, 两者在各水深的测量值相差极小。说明悬浮泥沙浓度极大地影响着 ADP 测量的准确性。



((a)  $0.2 H$  处; (b)  $0.4 H$  处; (c)  $0.6 H$  处; (d)  $0.8 H$  处。(a) at  $0.2 H$ ; (b) at  $0.4 H$ ; (c) at  $0.6 H$ ; (d) at  $0.8 H$ .)

图 6 不同高度处 ADP 与 ASM 对应 OBS 探头观测悬浮泥沙浓度(SSC)结果对比

Fig.6 Comparison of the suspended sediment concentration (SSC) observed by ADP and ASM at different heights

表 1 ADP 与 ASM 对应 OBS 探头观测悬浮泥沙浓度相对误差

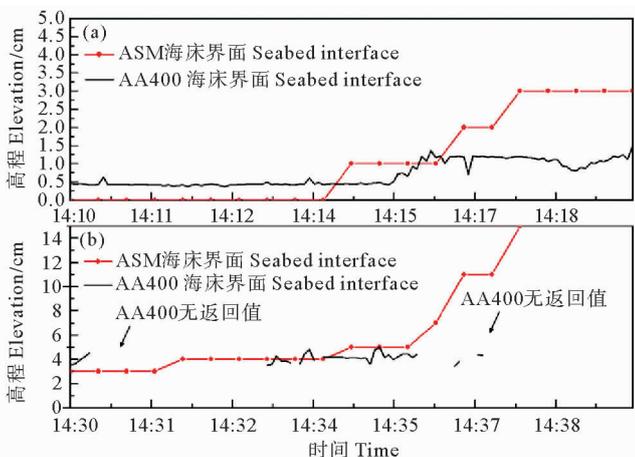
Table 1 Relative error of suspended sediment concentration observed by ADP and ASM /%

	0.2 H	0.4 H	0.6 H	0.8 H
沉降阶段前期 Early settlement stage	12.59	25.11	20.86	30.95
沉降阶段后期 Late settlement stage	8.66	10.87	7.81	11.06

2.2 海床界面观测

本文所采用的声学蚀积仪 AA400 可以垂直向下固定于四脚架进行海床高程测量,此外 ASM 也可以进行海床高程变化观测。ASM 探杆在原位观测的过程中,将探杆的一部分贯入海床,导致一部分 OBS 探头在海床界面以下,当水体悬浮泥沙浓度较低时,将超量程的数据分离出来,也可以得到海床界面位置。

选取加波阶段的前 10 min 和后 10 min 进行分析海床界面变化分析。图 7 为加波阶段的前 10 min 和后 10 min 两种仪器对海床界面变化的响应。在加波阶段的前 10 min,此时水体中悬浮泥沙浓度较低,ASM 和 AA400 均能得到理想的海床界面位置,两者绝对误差在 0.5 cm 左右波动。随着波浪作用时间增加,近底悬浮泥沙浓度上升,逐渐超出 ASM 的量程范围,影响了海床界面位置的判断精度,但 AA400 仍能较理想地得到海床界面位置。在加波阶段的后 10 min,根据 ASM 测得的悬浮泥沙浓度剖面可知(见图 8),该阶段悬浮沉积物浓度较高且变化剧烈,AA400 无法得到有效数据。水体中悬浮泥沙浓度超出 ASM 的测量量程,导致 ASM 无法分辨悬沙水体和海床界面。因此,在高悬浮泥沙浓度(>30 g/L)的情况下,AA400 和 ASM 均无



((a)加波阶段前 10 min;(b)加波阶段后 10 min。(a)The first ten minutes of wave action stage;(b)The last ten minutes of wave action stage.)

图 7 ASM 和 AA400 所测海床界面变化

Fig.7 Seabed interface changes obtained by ASM and AA400

法得到连续有效的海床界面位置,可作为风暴作用诱发大规模浮泥层发育的标志,并不影响 AA400 在实际使用过程中的适用性。

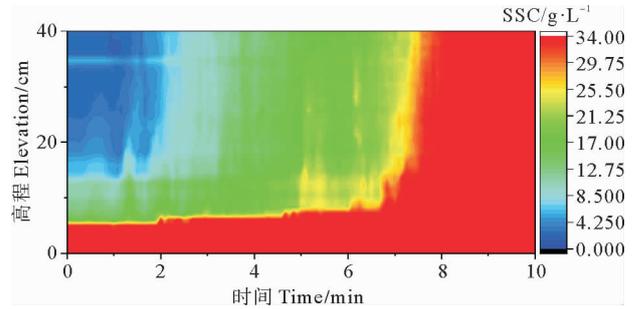


图 8 ASM 所测悬浮泥沙浓度剖面(加波阶段后 10 min)

Fig.8 Suspended sediment concentration profile obtained by ASM during the last ten minutes of settlement process

3 讨论

3.1 时空分辨率

表 2 展示了本文所用仪器相关指标。对于时间分辨率,AA400 直接输出相对高程,采集间隔为 5 s;ASM 进行观测时所有 OBS 探头同时工作,也可得出同一时间的悬浮泥沙浓度剖面,每 5 s 测量一次;ADV、ADP 直接输出声后向散射强度,ADP 采集频率可达 1 Hz,ADV 采集频率可从 1~64 Hz,具有高频优势。对于长时间尺度的原位观测,上述仪器的时间分辨率均能满足悬浮泥沙浓度和海床界面观测需要。

对于空间分辨率,ASM 探杆可以测量悬浮沉积物浓度剖面,OBS 传感器排列间隔为 1 cm,能对待测水体每 1 cm 分层进行观测;ADV 可以得到测量点处 15 mm 范围内流速与声后向散射强度,可视为单点数据;本文使用的高频 ADP 测量层厚范围可从 0.7~15 cm,空间分辨率较高,而非高频 ADP 测量层厚最小为 10 cm,空间分辨率较低;AA400 能够精确监测侵蚀、淤积引起的海床界面高程的变化速率,高程测量分辨率可达 1 mm。

表 2 海底浮泥层原位观测仪器技术指标

Table 2 Technical indicators for the in-situ observation instrument of the fluid mud

序号 Serial number	仪器 Instrument	时间分辨率 (采集频率) Time resolution	空间分辨率 Spatial resolution	精度 Accuracy
1	ASM	0.2 Hz	1 cm	±10%
2	ADV	1~64 Hz	单点	1%
3	ADP	1 Hz	0.7~15 cm	1%
4	AA400	0.2 Hz	<0.1 cm	1 mm

### 3.2 准确度

以上几种声、光仪器的准确度在实际工作过程中都会受到多种环境因素的影响,其影响因素主要包括:(1)悬浮泥沙浓度和气泡。试验中沉降阶段初期和加波阶段后期悬沙浓度较大,声衰减显著,从而影响了ADP、AA400等仪器的测量,该临界浓度受到仪器声波频率、海床沉积物性质等影响。(2)海床沉积物。OBS的响应与颗粒浓度成正比,与颗粒直径成反比<sup>[16]</sup>,当沉积物颗粒粒径随时间变化时,需要对OBS和粒径进行校正。此外海床沉积物的差异造成了对声波的吸收和散射效果不同,会影响声学仪器对海床界面的判定和悬浮泥沙沉积物的观测。(3)温度和盐度。不同的温盐会影响声波在水中的传播速度,导致海床高程测量出现误差。

悬浮泥沙浓度观测方面,根据拟合结果(见图3,4),在低浓度( $<10\text{ g/L}$ )情况下ASM、ADV、ADP均能准确有效地得到悬浮泥沙浓度数据。在高悬浮泥沙浓度的情况下( $\text{SSC}>20\text{ g/L}$ )(见图6),ADP所发射的高频声波穿透整个水体较为困难,声衰减作用显著,影响了对下部水体悬浮泥沙浓度的测量,相对误差最高可达30.95%(0.8H处)。在沉降过程的后期,整个水体的悬浮泥沙浓度降低,因此ADP与ASM所测结果重新有了良好的一致性,相对误差最高为11.06%(0.8H处)。该结果表明,使用ADP来测量悬浮泥沙浓度剖面极大地受到了水体悬浮泥沙浓度的制约,当水体中的悬浮泥沙浓度高于一定值时,无法准确地进行悬浮泥沙浓度剖面观测,且该值受到ADP声波频率、海床沉积物性质等影响。若水体中高浓度含沙层离海床较近,声波在上部水体中能量没有被大量衰减,此时ADP也可以有效、准确地测量该高浓度含沙层的悬浮泥沙浓度。

海床界面观测方面,AA400声波频率较低,能稳定测量海床界面高程变化,但在高悬浮泥沙浓度海况下难以工作。ASM简单地将超量程部分定义为海床界

面,在低悬沙浓度情况下观测结果良好(见图7),但随着悬沙浓度的上升,ASM无法将海床界面与高悬沙浓度水体分开,从而影响海床界面判别的准确性。AA400更适合进行海床界面位置的观测。

### 3.3 适用范围

ASM探杆使用光学原理,能对悬浮泥沙浓度剖面进行观测,适用于大多数的现场悬沙浓度观测。但由于探杆的工作原理,ASM只能观测探杆范围内的悬浮泥沙浓度剖面,无法满足大范围悬浮泥沙浓度剖面的观测需要,且ASM探杆本身会在一定程度上造成水体扰动,影响观测结果。ADV虽然只能获得单点的悬浮泥沙浓度变化,但是它不与观测点的水体直接接触,获得的数据较ASM探杆频率更高,可以根据高频泥沙浓度数据与所测的高频流速数据计算泥沙沉降速率<sup>[17]</sup>、底床切应力<sup>[18]</sup>等。ADP,特别是高频ADP具有上述两者的优点,且本身也不与待测水体直接接触,但是它会受到声衰减的影响,在高悬浮泥沙浓度海况下无法得到准确的观测结果,且由于仪器本身设计,增大测量分层密度需要减小测量的剖面范围,反之增大测量剖面范围需要减小分层密度,这在一定程度限制了ADP进行小范围观测的适用性,但大范围观测相对ASM探杆更具有优势。若单独使用ADP,则需要采集现场原位水样进行校正。表3展示了ASM、ADV、ADP与AA400对悬浮泥沙浓度条件和观测时长的适用范围,在符合该范围的前提下,若需测量SSC剖面,则选择ADP或ASM进行观测;若需高频测量单点SSC,则选择ADV进行观测。

AA400等声学测高仪器不会直接接触到海床界面,对现场扰动小,且声波频率较低,能稳定测量海床界面,观测时长可达一个月,但是在高悬浮泥沙浓度的海况下难以工作。ASM探杆需要插入海床造成扰动,也会受到量程的影响,因此在测量海床高程方面不如声学测高仪AA400有优势。

表3 不同仪器对浮泥层现场原位观测条件的适用范围

Table 3 Application scope of different instruments for in-situ observation conditions

	观测对象 Observation object	悬浮泥沙浓度条件 Condition of SSC	观测时长 Observation time	扰动情况 Disturbance
ASM	SSC剖面(0.01~1.44 m)、海床界面	$<30\text{ g/L}$	$<3$ 个月	对浮泥层有一定扰动
ADV	单点SSC	$<10\text{ g/L}$	$<1$ 个月	无扰动
ADP	SSC剖面(0.1~7 m)	$<10\text{ g/L}$	$<1$ 个月	无扰动
AA400	海床界面	$<30\text{ g/L}$	$<1$ 个月	无扰动

## 4 结论

(1)在较低悬浮泥沙浓度条件( $SSC < 10 \text{ g/L}$ )下对浮泥层进行现场原位观测时,ASM、ADV、ADP 均能完成悬浮泥沙浓度的观测要求,在  $SSC < 3 \text{ g/L}$  的情况下,ADV、ADP 与 ASM 观测结果十分接近。随着 SSC 的增加,ADV、ADP 测量准确度降低,在高悬浮泥沙浓度条件( $SSC > 20 \text{ g/L}$ )下,两者无法准确测量悬浮泥沙浓度。

(2)AA400 等声学测高仪器不会直接接触到海床界面,对现场扰动小,能稳定测量海床界面。ASM 探杆需要插入海床,会对海床造成一定的扰动,同时在高悬浮泥沙浓度情况下无法分辨悬沙水体和海床,因此在测量海床高程方面不如声学测高仪 AA400 有优势。

(3)海底浮泥层的现场原位观测,需要使用多种仪器相互配合。其中,AA400 更适合海床界面位置的观测,ASM 探杆更适合进行悬浮泥沙浓度的测量,但结合 ADV 和 ADP 观测到的浪流要素,能更加全面地描述风暴作用下海底浮泥层的动态演化过程,且 ADP 能对 ASM 测量范围外的悬浮泥沙浓度剖面进行补充。

## 参考文献:

- [1] Wright L D, Friedrichs C T. Gravity-driven sediment transport on continental shelves: A status report[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17-18): 2192-2107.
- [2] Traykovski P, Geyer W R, Irish J D, et al. The role of wave-induced density-driven fluid mud flows for cross-shelf transport on the Eel River continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(16): 2113-2140.
- [3] Hale R P, Ogston A S. In situ observations of wave-supported fluid-mud generation and deposition on an active continental margin[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(11): 2357-2373.
- [4] Wells, John T. Dynamics of coastal fluid muds in low-, moderate-, and high-tide-range environments[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1983, 40(S1): 130-142.
- [5] Kineke G C C, Sternberg R W W, Trowbridge J H H, et al. Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1996, 16(105): 5373-5377.
- [6] Ogston A S, Cacchione D A, Sternberg R W, et al. Observations of storm and river flood-driven sediment transport on the northern California continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(16): 2141-2162.
- [7] Baker E T, Lavelle J W. The effect of particle size on the light attenuation coefficient of natural suspensions[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1984, 89(C5): 8197-8203.
- [8] Wells J T, Kim S Y. The relationship between beam transmission and concentration of suspended particulate material in the Neuse River estuary, North Carolina[J]. *Estuaries*, 1991, 14(4): 395-403.
- [9] 张文祥, 罗向欣, 杨世伦. ADP 与 OBS 观测泥沙浓度实验对比研究[J]. *泥沙研究*, 2010(5): 59-65.  
Zhang W X, Luo X X, Yang S L. Comparison between measurements of suspended sediment concentration using ADP and OBS[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(5): 59-65.
- [10] 邢超锋, 何青, 郭磊城, 等. ASM 在近底泥沙浓度剖面观测中的应用研究[J]. *泥沙研究*, 2015(6): 46-51.  
Xing C F, He Q, Guo L C, et al. Application of ASM at the bottom observation of suspended sediment concentration[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(6): 46-51.
- [11] Hay A E, Sheng J. Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C10): 15661-15677.
- [12] Kawanisi K, Yokosi S. Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(8): 859-875.
- [13] 陈卫民, 杨作升, Prior D B. 黄河口水下底坡微地貌及其成因探讨[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 1992(1): 71-81.  
Chen W M, Yang Z S, Prior D B. The classification and analysis of seafloor micromorphology on the Huanghe River(Yellow River)subaqueous slope[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1992(1): 71-81.
- [14] 汪亚平, 高建华. 河口海岸区悬沙输运量的声学多谱勒流速剖面(ADCP)观测技术的初步研究[J]. *科学技术与工程*, 2003(5): 467-470.  
Wang Y P, Gao J H. A preliminary study on suspended sediment transport in coastal estuary by using ADCP[J]. *Science Technology and Engineer*, 2003(5): 467-470.
- [15] 郭磊, 文明征, 单红仙, 等. 基于 ASM-IV 对波致海床沉积物再悬浮过程研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 181-188.  
Guo L, Wen M Z, Shan H X, et al. Study on re-suspension process of seabed sediment induced by wave[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 181-188.
- [16] Fugate D C, Friedrichs C T. Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(11-13): 1867-1886.
- [17] Bian C, Mao X, Jiang W, et al. ADV-based estimates of sediment settling velocity on the shelf of the Yellow and East China seas: Evidence of marked seasonal and intra-tidal variations[J]. *Ge-Marine Letters*, 2015, 35(1): 53-60.
- [18] Soulsby R L, Clarke S. Bed shear-stress under combined waves and currents on smooth and rough beds (TR 137)[J]. 2005(1): 20-26.

## Comparative Study of In-Situ Observation of Dynamics of Fluid Mud Layers on the Seafloor with Acoustic and Optical Instruments

LIU Xiao-Lei<sup>1,2</sup>, MA Lu-Kuan<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, LU Yang<sup>1</sup>, CHEN An-Duo<sup>1</sup>, ZHANG Shu-Yu<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China)

**Abstract:** The dynamics of fluid mud layers on the seafloor play an important role in the study of seabed sediment transport and the topography evolution. Acoustic and optical instruments are mainly used to observe the key characteristic parameters of the fluid mud layers (i.e., suspended sediment concentration and upper and lower interfaces) in the world. Due to the different observing principles, however, there are certain limitations for different instruments in application. This paper compares the effects of observing the suspended sediment concentration and the seabed interface elevation with different instruments, by simulating the dynamic process of the fluid mud layers on a tidal flat. The results show that in the case of low suspended sediment concentration ( $<10$  g/L), the Argue Surface Meter (ASM), Acoustic Doppler Velocimetry (ADV), and Acoustic Doppler Profilers (ADP) can meet the observation requirements of suspended sediment concentration, and the Echo logger (AA400) and ASM can obtain the elevation of seabed accurately. In the case of higher suspended sediment concentration ( $>20$  g/L), the relative error of ADP relative to ASM can reach 30.95% due to the significant sound attenuation effect, which makes it difficult to measure the suspended sediment concentration accurately by ADP. With the increase of suspended sediment concentration ( $>30$  g/L), AA400 cannot obtain continuous and effective seabed interface elevation, and ASM is difficult to work because of overrange. So the SSC of 30 g/L can be further used as an indication for the high-density fluid mud formed under storm waves. The study of dynamics of fluid mud layers under the complex sea conditions requires multiple instruments to cooperate with each other.

**Key words:** fluid mud layers; acoustics; optics; suspended sediment concentration; seabed interface

责任编辑 徐 环