

高频声学仪器底床高度野外测量及室内验证

孙剑雄¹, 张文祥^{1*}, 史本伟^{1,2}, 汪亚平¹, 黄远光¹

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241;

2. 自然资源部 海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:河口海岸地区底床的冲淤变化是沉积动力学研究主要内容之一, 而野外观测是准确获得现场底床冲淤变化信息的关键。本文利用观测近底边界层三维水动力信息的声学三维多普勒流速仪 (Acoustic Doppler Velocimetry, ADV) 对长江口南槽底床高度变化进行了野外测量, 为验证野外现场实测数据的可靠性, 设计了 2 个室内试验, 并对 ADV 测量底床高度的可行性进行了验证: 试验一对比了人工测量的 ADV 换能器实际距离底床高度 H 与 ADV 自身记录的其换能器距离底床高度 h , 确定了 ADV 测量底床高度的范围; 试验二利用 ADV 测量静置的高浊度水体, 确定了含沙量对 ADV 测量造成影响。试验结果表明: ①由 ADV 内部存储的 vhd 数据文件可以直接获取换能器距离底床的高度, 但是这一测量结果存在适用范围, 换能器实际距离底床高度 H 需要满足 $150\text{ mm} \leq H \leq 370\text{ mm}$; ②当换能器实际距离底床高度 $H < 150\text{ mm}$ 时, 可通过提取 pck 数据文件获取换能器距离底床的高度; ③当换能器实际距离底床高度 $H > 370\text{ mm}$ 时, 仪器无法获取该数值; ④当水体含沙量超过 14.36 kg/m^3 时, ADV 测量同样无法获取到换能器距离底床高度信息。

关键词: ADV; 底床高度; 回声强度; 底床冲淤

中图分类号: P714⁺.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)02-0105-10

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20211223001

引用格式: 孙剑雄, 张文祥, 史本伟, 等. 高频声学仪器底床高度野外测量及室内验证 [J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 105-114. SUN J X, ZHANG W X, SHI B W, et al. Field measurement and indoor validation of bottom bed elevation by using high frequency acoustic instrument [J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 105-114.

河口海岸潮间带浅水区域地形的冲淤和微地貌的变化, 是沉积动力学研究的热点。了解潮间带浅水区域冲淤的时空变化规律对潮滩地形地貌演变研究和海岸工程防护具有重要指导和现实意义。关于潮间带浅水区域冲淤变化研究, Yang 等^[1]通过对比不同时段数字化海图来判断潮间带向海淤积或是向陆侵蚀, 并通过对比 0 m 线所在位置来判断潮间带的冲淤变化, 但是这种方法很难揭示潮间带区域冲淤变化的具体细节。张晓冬等^[2]通过遥感影像提取海滩水边线, 以此来分析整个潮间带的冲淤变化, 但是由于遥感影像为垂直视角且受光线影响等, 其反演精度仍有待提高。沉积物沉积速率研究中广泛采用的方法有同位素测年法。王爱军等^[3]利用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的半衰期测量了沉积物数十年尺度的沉积速率, 但是对于潮滩的侵蚀过程而言, 该方法并不适用。Yang 等^[4]和 Fan 等^[5]在滩面出露期间采用双桩法测量了滩面局部高程变化, 但由于潮间带宽广、滩面植被发育以及滩面质地松软等因素影响, 难以保证连续准确的观测要求, 观测效率也有待提升。Yang 等^[6]、谢卫明等^[7]和 Mancini 等^[8]利用 RTK-GPS 和三维激光扫描仪测量了滩面高程变化, 尽管 RTK-GPS 技术很大程度上提高了观测效率, 但其点位式的观测方式仍然无法满足浅水区域的实时观测要求。三维激光扫描仪可以快速获取大面积、高精度的点云数据, 满足高精度、大面积的测量要求, 但无法揭示潮水淹没期间以及风暴潮时期底床的动态冲淤变化信息。

近年来, 声学技术的发展催生出了一一种可以准确、连续观测淹没期间底床冲淤变化的方法^[9-10]。声学三

收稿日期: 2021-12-23

资助项目: 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金项目——潮滩底栖动物对风暴天气沉积动力过程的响应机制 (2021COSIMZ001); 科技部政府间 (中荷) 国际科技创新合作重点项目——应对转型中的河口三角洲 (2016YFE0133700); 上海市科委重点项目——长江河口滩涂生态脆弱区监测与安全预警关键技术 (20dz1204701)

作者简介: 孙剑雄 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事潮滩动力地貌方面研究。E-mail: sunjx1995@126.com

* 通信作者: 张文祥 (1966—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事河口沉积动力过程及现场观测技术方面研究。E-mail: wxzhang@sklec.ecnu.edu.cn

(王佳实 编辑)

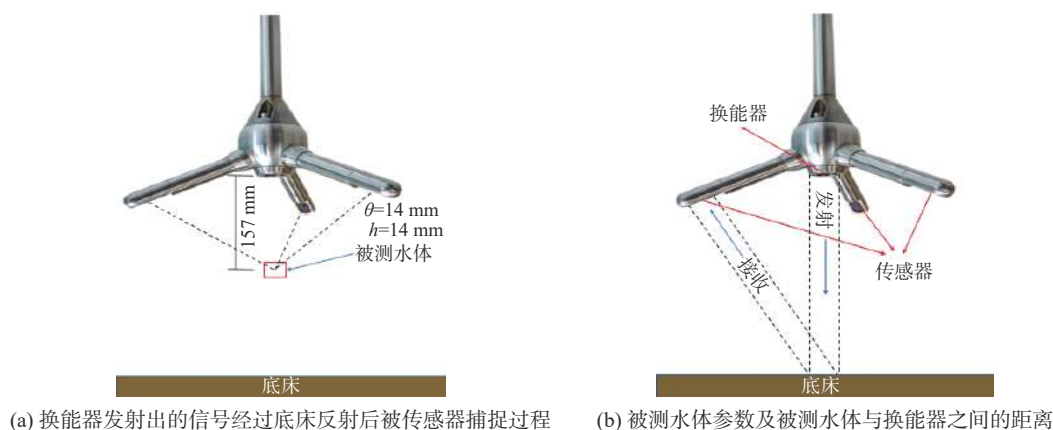
维多普勒流速仪(Acoustic Doppler Velocimetry, ADV)被广泛应用于近底边界层以及潮间带浅水区域的沉积动力过程研究中^[11-13]。国外, Salehi Mehrdad 等^[14]在 San Jacinto 河口区设立了 3 个不同动力环境的观测站点, 利用 ADV 进行水动力数据采集; 国内, Wang 等在长江口和江苏沿岸淤泥质潮滩上利用 ADV 开展了一系列潮间带沉积动力过程的前驱研究^[15-16]。ADV 不仅可以通过高频采样(最高 64 Hz)获得某一高度水体紊动信息, 同时, 还可以对中间传感器信息进行提取, 获得高频率底床高度的变化^[13, 17]。Shi 等^[18-20]也利用 ADV 在野外开展了多项研究, 但在分析野外现场数据时发现了一些异常现象: ①在长时间的野外观测中, 随着时间的推移, 发现有时在水动力较弱的环境下, 测量结果却显示底床发生了较大的侵蚀(超过 10 cm), 这与水动力较弱时常常发生淤积的情况不相符; ②在仪器正常的流速测量范围内, 得到的底部高程变化数据有时会发生异常跳动, 甚至突变为 0, 经过一段时间后, 数据又恢复正常。作为上述工作的延续, 我们对异常现象进行了分析, 认为可能的原因有: ①ADV 换能器距离底床高度的测量可能具有一定的适用范围, 野外现场底床的冲淤变化造成底部高度超出了仪器的测量范围; ②由于野外现场泥沙量丰富、泥沙颗粒小, 在水动力较强的情况下, 水平输运以及局地再悬浮会引起水体中含沙量激增, 影响到 ADV 测量信号的接收。为验证上述原因是否会造成 ADV 测量异常, 本文从设计 ADV 室内试验出发, 研究 ADV 测量底床高度变化的可行性及准确性, 以期在野外环境下 ADV 的布设以及底床高度变化信息提取提供参考。

1 试验原理与方法

野外环境下, ADV 测量会受到仪器姿态、底床冲淤变化、水体含沙量及水体紊动等多因素的影响。为了确定单一变量对 ADV 测量带来的影响, 本研究通过室内试验来控制仪器姿态和水体紊动, 探究底床冲淤变化和水体含沙量对 ADV 测量的影响, 还原 ADV 在野外真实的工作环境。

1.1 试验原理

声学三维多普勒流速仪 ADV 利用多普勒效应测量水流速度, 方法是换能器发送一个短时间脉冲, 传感器通过接收回声并测量回声的音调或频率的变化来获取水体流速信息(图 1)^{[21]①}。本次试验采用的仪器为挪威 Nortek “威龙 vector”, 主要获取距离换能器 157 mm 处水体的三维流速信息(图 1a), 该仪器不仅可以测量水体的流速信息, 还可以获取底床冲淤变化信息。在每个采样周期开始和结束时仪器换能器均会发射一束声波信号, 声波信号在接触到底床后发生反射, 通过计算传感器接收到的反射信号强度及时间差, 从而得到换能器与底床的相对高程(图 1b)。



注: ϕ 为水质点直径, h 为被测水体高度。

图 1 ADV 测量过程及相关参数

Fig. 1 Process and related parameters of ADV measurement

① Nortek Inc. Vector current meter user manual, 2005.

1.2 野外观测

2017 年 10 月 20 日至 10 月 28 日在长江口南槽开展了定点观测(图 2a), 采用三脚架坐底观测系统搭载 ADV 和激光边界层悬浮剖面测量仪 ASM-IV(Argus Surface Meter IV)(量程为 0~4 000 NTU)获取野外现场流速、底床相对高度以及含沙量数据, 并采集野外现场底质样品和悬沙水样用于室内仪器的标定工作。三脚架上仪器距离底床高度如图 2b 所示。

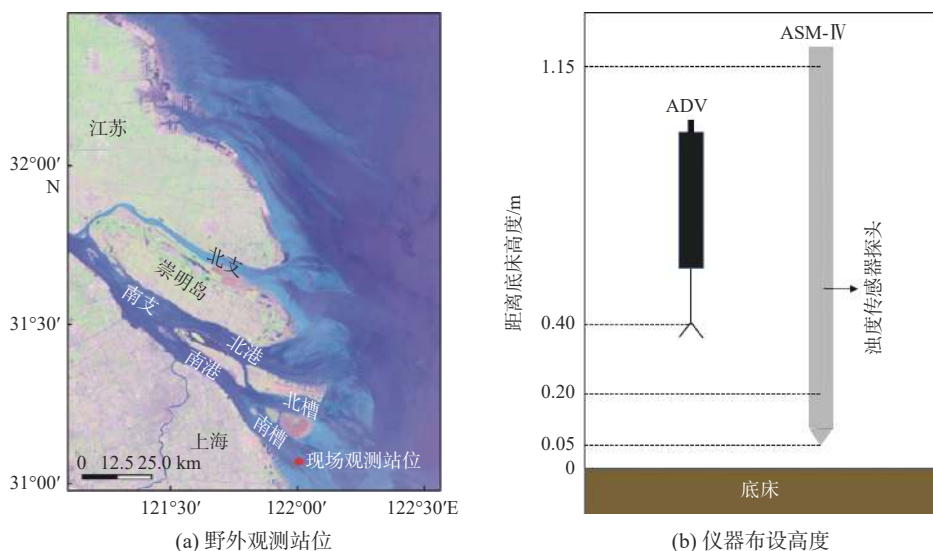


图 2 野外观测站位和仪器布设高度

Fig. 2 Location of field observation station and instrument layout height

1.3 室内试验

1) 试验一

选取 2 台威龙 vector ADV(编号为 5653 和 4846)进行试验, 仪器采样频率为 1~64 Hz, 最大适应水深为 300 m。为尽可能多地采集试验数据, 保证数据测量结果的准确性, 采样间隔设置为 10 s, 采样数为 80 个(表 1)。本试验在圆柱形桶内进行(图 3), 为更好地还原野外现场底质环境, 试验开始前在桶内底部铺上 50 mm 厚的野外现场底质样品, 然后将 ADV 固定在桶内的支架上, 向桶内缓慢注入清水, 使 ADV 完全淹没在清水之中。试验开始时, 换能器距离桶底部高度 50 mm 处, 等待 ADV 测量 2 min 后, 提升换能器高度 10~20 mm, 等待 ADV 测量 2 min 后再次提升换能器高度, 由此往复, 直至换能器高度达到 500 mm 左右时结束试验记录。每次提升换能器高度后都会通过刻度尺(精确到 mm)测量换能器距离桶底部的高度, 并记录为人工测量 ADV 换能器距离底部的实际高度(H)。ADV 在 2 min 内共记录到 12 组数据, 为了保证数据的准确性, 对 12 组数据进行平均, 结果记录为仪器测量 ADV 换能器距离底部高度(h)。为了验证仪器自身记录数据 h 和人工实测数据 H 是否一致, 按照时间将 H 与 h 进行对应, 并做散点分布图, 比较两者之间的差距。

2) 试验二

使用浊度传感器 OBS-3A(美国, Campbell)测量水体浊度, 固定 OBS-3A 和 ADV 于圆柱形桶内, 保证 OBS 传感器、ADV 换能器以及桶内取水口三者高度平齐(高度为距离桶底部 20 cm), 将野外现场采集的高含沙量浑浊水体注入到桶内并搅拌均匀, 经过浊度传感器测量, 浊度值最高达到 4 899 NTU, 搅拌均匀后静置水体开始试验测量。通过浊度传感器实时读数记录各时间段取水口处水体浊度, 同步打开取水口进行水样采集, 直至水体清澈后停止试验记录。后续对采集的水样进行抽滤、烘干、称重, 确定各时间段水体的含沙量。根据试验记录的水体采样时间, 同步到仪器高度记录数据, 提取出各时间段仪器测量到的换能器距离底部高度 h 。

表 1 ADV 参数设置 (burst 模式)

Table 1 Settings of ADV parameters (burst pattern)

项 目	ADV 型号	
	威龙 vector5653	威龙 vector4846
采样频率/Hz	16	16
采样间隔/s	10	10
采样数/个	80	80

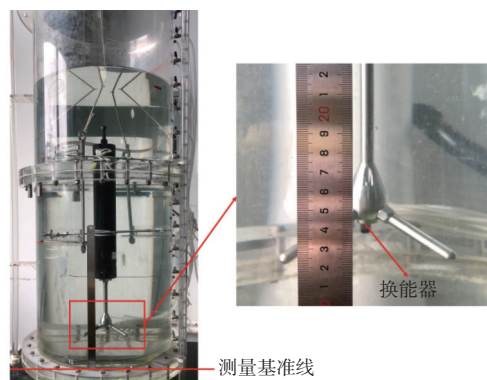


图 3 室内试验

Fig. 3 Indoor experiments

1.4 数据处理

试验二中浊度传感器测量了水体的浑浊程度, 单位为 NTU, 通过仪器标定关系式将浊度值转换成水体的含沙量 (图 4)。按照试验时间将 ADV 内部 vhd 文件记录的换能器距离底部高度 h 与水体含沙量大小进行对应, 确定不同含沙量情况下仪器测量结果。

对野外现场采集到的 ADV 换能器距离底部高度 h 进行提取, 绘制底床相对高度变化的时序图 (图 5a)。室内通过标定实验将 ASM-IV 记录的浊度值转换成水体的含沙量, 同步绘制出整个观测期间水体含沙量的垂向变化 (图 5b)。

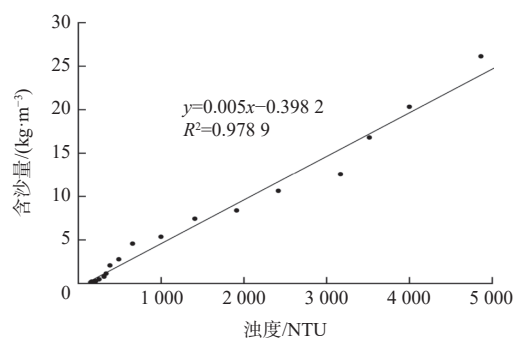


图 4 浊度传感器室内标定曲线

Fig. 4 Indoor calibration curve of turbidity sensor

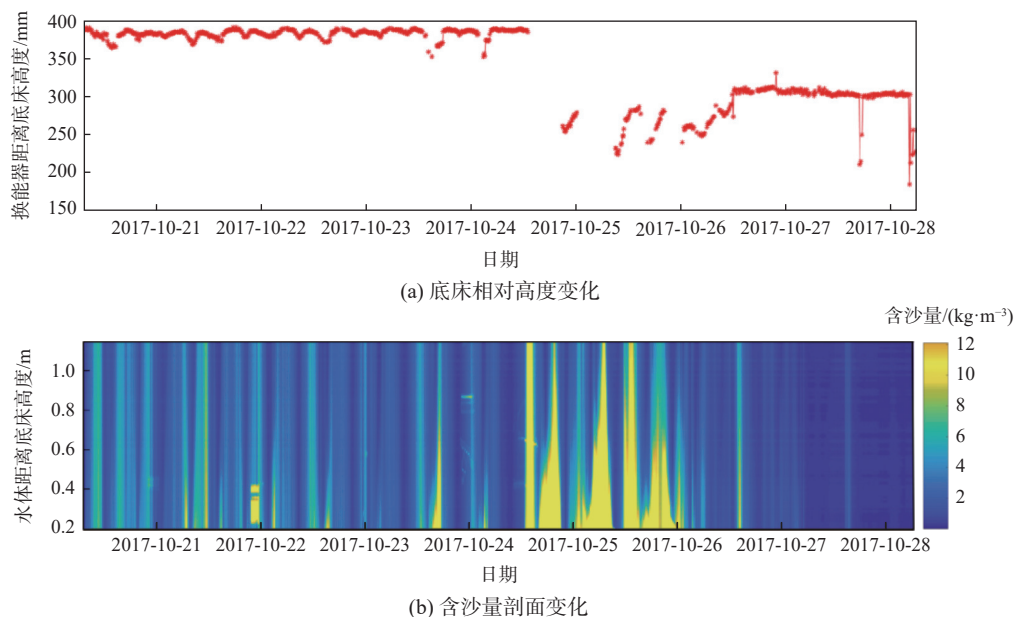


图 5 野外实测底床相对高度和含沙量剖面变化

Fig. 5 The changes of relative bottom bed elevation and sediment concentration profile were measured in the field

2 结 果

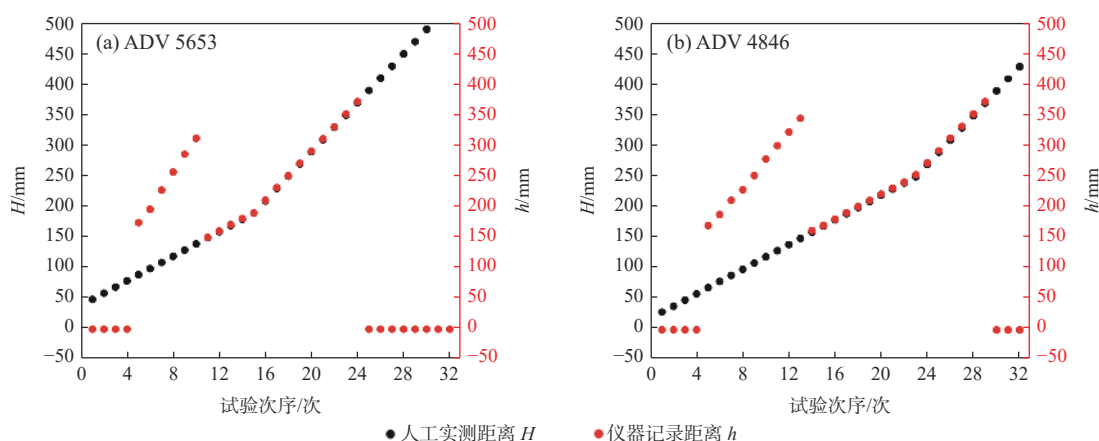
2.1 野外底床及含沙量变化

受强台风“兰恩”影响,观测点附近最大风速达到 16.5 m/s。10 月 20 日至 24 日台风期间,由图 5 底床相对高度和现场实测含沙量剖面分布可知,部分时段水体中含沙量较高,但换能器距离底床高度稳定在 380 mm 附近。10 月 24 日至 26 日台风过后,该时段观测架附近出现浮泥层,含沙量超过了 ASM-IV 的最大量程,距离底床 1 m 范围内的水体含沙量由最低值 0.12 kg/m^3 突增至 12 kg/m^3 ,并超出了 ASM-IV 的量程范围,实际的含沙量超过了 12 kg/m^3 。在该时段内,ADV 底床高度数据也未能获得,导致了底床变化数据的不连续。由于受到浮泥层的影响,换能器距离底床高度由 380 mm 降低至 280 mm 附近,底床抬升了近 100 mm。10 月 26 日之后,悬浮在水体中的沉积物由于沉降和海流输运作用,水体含沙量下降,换能器距离底床高度稳定在 300 mm 左右。

2.2 室内 ADV 测量

2.2.1 ADV 底部高度测量

图 6 为试验一中人工实测数据(H)与仪器自身记录数据(h)的散点分布。由图 6 可见,2 个不同编号仪器记录的数据中, H 在第 16 次时发生“转折”,当 $150 \text{ mm} \leq H \leq 370 \text{ mm}$ 时, H 与 h 散点基本重合,该范围内人工实测距离 H 与仪器记录距离 h 相同;当 $H \leq 70 \text{ mm}$ 和 $H > 370 \text{ mm}$ 时, h 均为 0,该范围内仪器内部 vhd 文件并没有记录到有效数据。考虑到 ADV 内部程序在该范围内可能会对底部实际高度产生误判,从而造成测量高度 h 记录为 0。因此,通过人为处理记录高程及回声强度相关关系的 pck 文件,提取并绘制出 $H=50 \text{ mm}$ 和 $H=410 \text{ mm}$ 时,ADV 记录的高程及回声强度曲线图(图 7)。当 $H=50 \text{ mm}$ 时,图 7a 和图 7e 出现多处峰值,其中第二处峰值所对应的距离 D 分别为 43.5 mm 和 51.6 mm;当 $H=410 \text{ mm}$ 时,图 7d 和图 7h 均只出现 1 处峰值,对应的距离 D 分别为 17.5 mm 和 18.1 mm。当 $70 \text{ mm} < H < 150 \text{ mm}$ 时,该范围内 H 与 h 散点不重合, h 明显大于 H ,ADV 内部 vhd 文件记录到的数据 h 不准确(图 6)。通过计算 h 与 H 之间的距离差值 Δh ,建立 H 与 Δh 间的关系(图 8)。



注: X轴为提升换能器高度的次数; Y轴为换能器与底床的距离。

图 6 人工实测距离与仪器记录距离分布

Fig. 6 Distributions of distance measured artificially and distance recorded by instrument

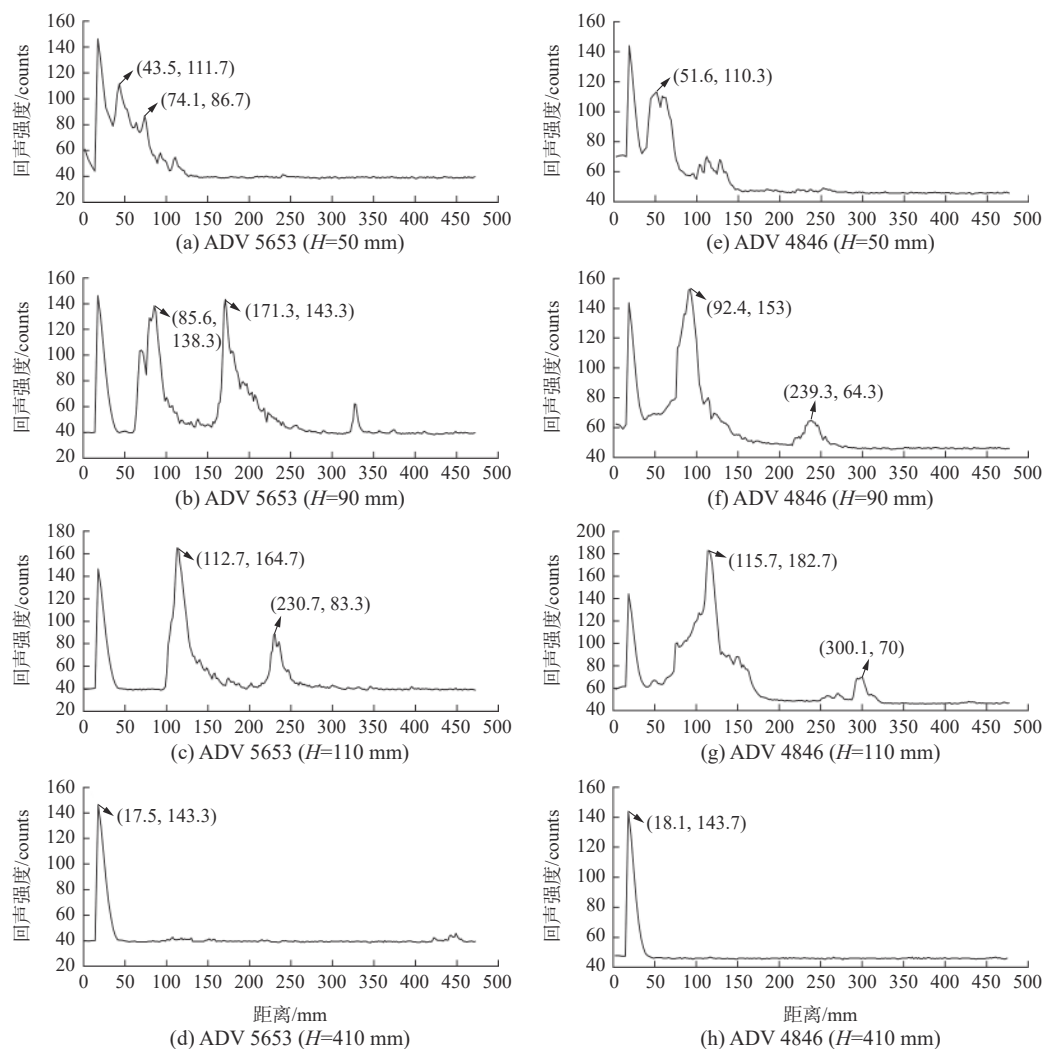
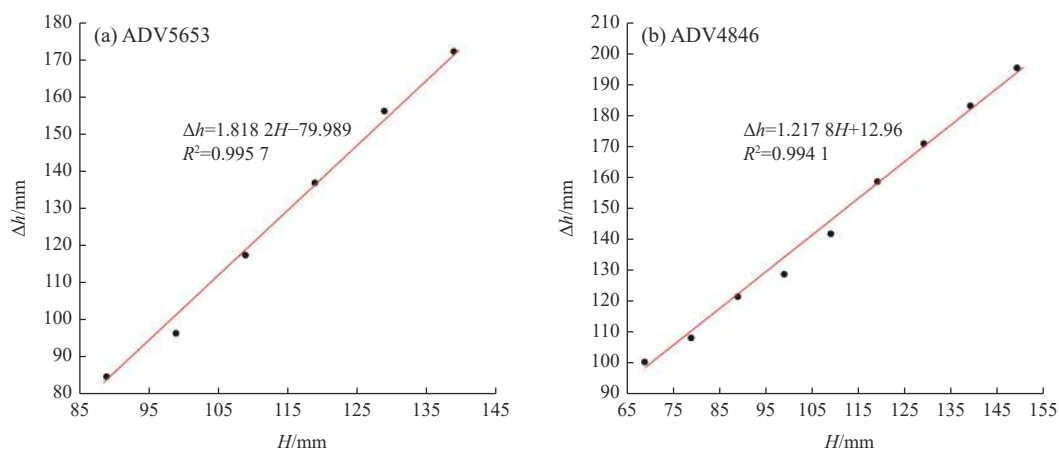


图 7 距离换能器不同高度处回声强度曲线

Fig. 7 Echo intensity curves at different heights away from the transducer



注: Δh 为 h 以及 H 之间的差值 ($70 < H < 150$ mm), R^2 为相关系数。

图 8 H 与 Δh 关系Fig. 8 Relationship between H and Δh

由图 8 可见, Δh 与 H 具有很强的相关性, Δh 随着 H 的增加而增加, 相关系数 R^2 达到 0.99 以上。我们认为在 $70 \text{ mm} < H < 150 \text{ mm}$ 范围内, 距离差值 Δh 的大小受到 H 的控制。当 $70 \text{ mm} < H < 150 \text{ mm}$ 时, 同样通过人为处理仪器内部 pck 文件, 提取并绘制出 $H=90 \text{ mm}$ 和 $H=110 \text{ mm}$ 时, ADV 记录到的高程及回声强度曲线图。当 $H=90 \text{ mm}$ 时, 图 7b 和图 7f 出现多处峰值, 其中第二处峰值所对应的距离 D 分别为 85.6 mm 和 92.4 mm , 第三处峰值所对应的距离 D 分别为 171.3 mm 和 239.3 mm 。当 $H=110 \text{ mm}$ 时, 曲线图与 $H=90 \text{ mm}$ 时类似, 第二处峰值所对应的距离 D 分别为 112.7 mm 和 115.7 mm , 第三处峰值所对应的距离 D 分别为 230.7 mm 和 300.1 mm 。

2.2.2 含沙量对 ADV 测量的影响

试验二中桶内泥沙搅拌均匀后静置, 随着试验的进行泥沙缓慢沉降, 水体含沙量逐渐减小(图 9)。停止搅拌时, 水体含沙量最大, 达到 23.99 kg/m^3 ; 试验记录结束时, 水体含沙量最小, 为 0.32 kg/m^3 。当水体含沙量 $> 14.36 \text{ kg/m}^3$, 仪器记录的高度均为 0, 此时仪器无法探测到换能器距离底部高度。当含沙量 $< 14.36 \text{ kg/m}^3$, 仪器记录到真实的换能器距离底部高度, 并且换能器距离底部高度随着含沙量的减小而逐渐减小。因为随着泥沙的沉降, 桶内泥沙逐渐堆积在底部, 造成了换能器距离底部高度减小, 底部泥沙的堆积高度为 2.72 mm 。

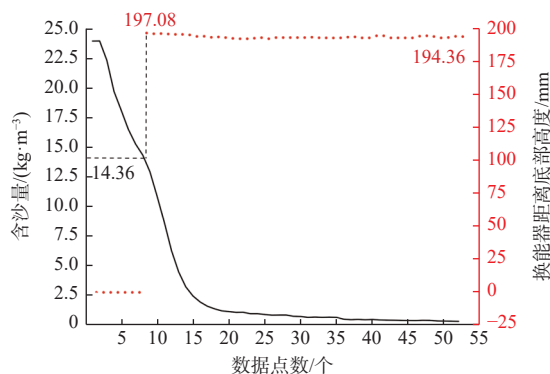


图 9 含沙量曲线变化

Fig. 9 Variation curve of sediment concentration

3 讨 论

试验一中采用了 2 个不同编号的 ADV 进行试验, 获得的数据变化趋势保持一致, 可以排除不同编号的仪器对试验造成的影响。通过对比 h 和 H 发现, 当 $150 \text{ mm} \leq H \leq 370 \text{ mm}$ 时, h 和 H 数值上相互吻合, 认为在该范围内 ADV 内部 vhd 文件记录的数据是准确的, 在野外现场安装仪器时, 保证换能器与底床距离在此范围内, 仪器是能够准确记录底床相对高程的变化。当 $H \leq 70 \text{ mm}$ 和 $H > 370 \text{ mm}$ 时, 仪器内部 vhd 文件记录的数据 h 均为 0, 可见在该范围内通过直接读取仪器自动记录的 h 是无法获取准确的换能器距离底部高度数据。通过提取 pck 文件中高程及回声强度曲线图发现: 当 $H=50 \text{ mm}$ 时, 曲线图中出现多处峰值, 因为换能器与底床距离过近, 信号经过多次反射多次被传感器接收, 从而造成仪器无法判断底床的位置。通过对比曲线图中第二处峰值所对应的距离 D 与换能器实际距离底部高度 H , 发现 $D=43.5 \text{ mm}$ 和 $D=51.6 \text{ mm}$ 与 H 较为接近(图 7a 和图 7e), 认为当 $H \leq 70 \text{ mm}$ 时, 可以通过人为提取 pck 文件内的信息, 判断第二峰值所对应的距离 D 的大小, 来弥补因 ADV 误判造成数据的缺失。但是此方法还存在误差, 因此在野外安装仪器时应该避免换能器距离底部高度过近。当 $H > 370 \text{ mm}$ 时, 图 7d 和图 7h 均只出现一处峰值, 所对应的距离 D 分别为 17.5 mm 和 18.1 mm , 该距离约为换能器与传感器的间距, 不能被认为是底床所处的高度。经分析认为, 出现单峰值是由于底床与换能器距离过大, 信号经过衰减后无法被传感器接收, 造成仪器自动记录的 $h=0$ 。当 $70 \text{ mm} < H < 150 \text{ mm}$ 时, 仪器记录的数据 h 明显大于实测数据 H , 如果利用该范围内仪器记录的数据 h 做判断会得出相反的结论。如在

野外环境中, 安装的换能器与底床距离起始时是在 150~370 mm 的正常范围内, 由于水动力环境较弱, 大量细颗粒沉积物在底床沉积, 造成换能器与底床距离逐渐减小, 当换能器与底床距离减小至 70~150 mm 的范围内, 仪器记录的数据 h 会发生“跳跃”, 显著大于实际换能器与底床的距离。由于仪器记录数值的突增, 会被误认为研究区域发生了明显的侵蚀事件, 而实际上研究区域是逐渐淤积, 由仪器自身造成的误判。当 $70 \text{ mm} < H < 150 \text{ mm}$ 时, 突增量 Δh 受到 H 的控制, 但是 2 次试验中 Δh 和 H 的表达关系式并不相同, 由于不同编号仪器的表达式并不相同, 在未知表达式的情况下, 该范围内所测数据无法还原真实的换能器与底床的距离。但是通过提取 pck 文件内部信息可以发现, 曲线图中第二峰值处所对应的距离 D 均与实际高度 H 相接近, 如 $H=90 \text{ mm}$ 时, 2 台仪器对应的距离 D 分别为 85.6 mm 和 92.4 mm; $H=110 \text{ mm}$ 时, 2 台仪器对应的距离 D 分别为 112.7 mm 和 115.7 mm, 对于野外现场观测来说, 误差均在可接受的范围之内。因此, 当仪器内部 vhd 文件记录的数据 h 发生明显“跳跃”时, 应该人为利用仪器内部 pck 文件, 提取出第二峰值处所对应的距离 D , 来判断 vhd 文件数据的真实性。

通过对野外现场观测数据分析, 10 月 24 日之前换能器与底床高度稳定在 $(380 \pm 10) \text{ mm}$, 受涨落潮的影响, 底床高度有 10 mm 的变幅。对比室内试验一结果可知, 当 ADV 记录的结果处于 340~370 mm 时, 换能器实际距离底部高度 H 和 ADV 记录的数据 h 一致, 认为 ADV 在该范围内的记录结果是真实的换能器距离底部高度。当整体变化范围处于 370~390 mm, 虽然室内试验是在桶内进行的, 跟野外环境相比, 桶的直径较小, 桶内空间有限, 但当换能器距离底部高度 $\geq 370 \text{ mm}$ 时, 可能会造成信号在桶壁内发生反射、吸收, 并造成传感器无法接收到信号, 这种可能性需要后续试验进一步研究。结合野外现场实测数据发现仪器记录的数据稳定, 因此认为该数据是较为可信的。10 月 26 日之后, ADV 记录的数据结果稳定在 300 mm, 造成该结果存在 2 种可能: ①换能器距离底床高度确实是 300 mm, 并被 ADV 准确记录到; ②由于淤泥层的存在, 底床淤高造成换能器距离底床真实的高度处于 70~150 mm 范围内, 试验一表明 ADV 内部 vhd 文件在该范围内会产生错误记录。结合野外现场含沙量分析, 如果淤泥层的存在造成换能器距离底床高度处于 70~150 mm 范围内, 那么相比之前而言, 底床高度抬升了 230~310 mm, 那么放置在距底 200 mm 的 ASM-IV 探头会被泥沙覆盖, 但是 10 月 26 日之后并未记录到高含沙量事件的发生, 所以可能性②被排除, 野外现场 ADV 记录的数据为真实的换能器距离底床高度。

通过试验二可知, ADV 换能器距离底部高度的测量会受到水体含沙量的影响, 当水体含沙量超过 14.36 kg/m^3 时, 信号无法穿透高含沙量水体, 反射信号无法被传感器接收, 导致仪器出现测量数据为 0 的异常情况。野外现场实测数据也验证了该观点, 实测含沙量超出了仪器的量程范围, 野外现场实际的含沙量 $> 12 \text{ kg/m}^3$, 高含沙量的时间段内野外现场布设的 ADV 没有记录到底床高度数据。在野外高含沙量的水体环境中, 通过 ADV 测量底床的变化仍有局限性。

4 结 语

用于野外现场观测水体单点三维流速的 ADV 具有观测底床相对高程变化的能力, 在获得高频率水动力数据的同时, 可以同步获得野外现场底床相对高程的变化, 结合水动力变化信息可以更加真实准确地反映出底部边界层冲淤变化信息。底床含沙量大小及变化影响 ADV 的测量结果, 本次试验的泥沙颗粒中值粒径为 35.54 mm, 平均粒径为 41.59 mm, 在含沙量 $< 14.36 \text{ kg/m}^3$ 时, ADV 可以有效的获得野外现场底床高度变化信息。因此, 利用 ADV 野外测量的三维高频流速, 结合含沙量的大小和变化, 以及同步获得准确的床面冲淤变化值来进行床面侵蚀淤积的动力机制分析, 为河口潮间带区域沉积动力学研究提供一种新的手段。

参考文献 (References):

- [1] YANG S L, MILLIMAN J D, LI P, et al. 50, 000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011,

- 75(1/2): 14-20.
- [2] 张晓冬, 沈斯敏, 朱首贤, 等. 海口湾海滩冲淤遥感分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2015(4): 12. ZHANG X D, SHEN S M, ZHU S X, et al. Analysis of the coastal erosion and accretion in Haikou Bay by remote sensing[J]. Journal of East China Normal University: Natural Sciences, 2015(4): 12.
- [3] 王爱军, 高抒, 贾建军, 等. 江苏王港盐沼的现代沉积速率[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 61-70. WANG A J, GAO S, JIA J J, et al. Contemporary sedimentation rates on salt marshes at Wanggang, Jiangsu, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 61-70.
- [4] YANG S L, FRIEDRICHS C T, ZHONG S, et al. Morphological response of tidal marshes, flats and channels of the outer Yangtze River mouth to a major storm[J]. *Estuaries*, 2003, 26(6): 1416-1425.
- [5] FAN D D, GUO Y X, WANG P, et al. Cross-shore variations in morphodynamic processes of an open-coast mudflat in the Changjiang Delta, China: with an emphasis on storm impacts[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(4): 517-538.
- [6] YANG S L, DING P X, CHEN S L. Changes in progradation rate of the tidal flats at the mouth of the Changjiang (Yangtze) River, China[J]. *Geomorphology*, 2001, 38(1/2): 167-180.
- [7] 谢卫明, 何青, 章可奇, 等. 三维激光扫描系统在滩涂地貌研究中的应用[J]. 泥沙研究, 2015(1): 1-6. XIE W M, HE Q, ZHANG K Q, et al. Application of terrestrial laser scanner to measuring geomorphology in tidal flats and salt marshes[J]. Journal of Sediment Research, 2015(1): 1-6.
- [8] MANCINI F, DUBBINI M, GATTELLI M, et al. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6880-6898.
- [9] 肖洋, 唐洪武, 毛野, 等. 新型声学多普勒流速仪及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 15-18. XIAO Y, TANG H W, MAO Y, et al. New Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) and its application[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(3): 15-18.
- [10] ANDERSEN T J, FREDSOE J, PEJRUP M. In situ estimation of erosion and deposition thresholds by Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 75(3): 327-336.
- [11] ZHU Q, VAN PROOIJEN B C, WANG Z B, et al. Bed-level changes on intertidal wetland in response to waves and tides: a case study from the Yangtze River Delta[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 160-172.
- [12] SHI B W, COOPER A M R, LI J S, et al. Hydrodynamics, erosion and accretion of intertidal mudflats in extremely shallow waters[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 31-39.
- [13] SHI B W, WANG Y P, YANG Y, et al. Determination of critical shear stresses for erosion and deposition based on in situ measurements of currents and waves over an intertidal mudflat[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(6): 1344-1356.
- [14] SALEHI M, STROM K. Measurement of critical shear stress for mud mixtures in the San Jacinto estuary under different wave and current combinations[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 47: 78-92.
- [15] WANG Y P, GAO S, JIA J J, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 147-61.
- [16] WANG Y P, ZHANG S, SCIENCES C O, et al. Geomorphic and hydrodynamic responses in salt marsh-tidal creek systems, Jiangsu, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44: 544-549.
- [17] CHEN D Z, LI M L, ZHANG Y Y, et al. Effects of diatoms on erosion and accretion processes in saltmarsh inferred from field observations of hydrodynamic and sedimentary processes[J]. *Ecohydrology*, 2020, 13(8): e2246.
- [18] SHI B W, PRATOLONGO P D, DU Y F, et al. Influence of Macrobenthos (*Meretrix meretrix* Linnaeus) on erosion-accretion processes in intertidal flats: a case study from a cultivation zone[J]. Journal of Geophysical Research:Biogeosciences, 2020, 125(1): e2019JG005345.
- [19] SHI B W, WANG Y P, DU X, et al. Field and theoretical investigation of sediment mass fluxes on an accretional coastal mudflat[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2016, 11: 75-90.
- [20] SHI B W, WANG Y P, WANG L H, et al. Great differences in the critical erosion threshold between surface and subsurface sediments: a field investigation of an intertidal mudflat, Jiangsu, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 206: 76-86.
- [21] 张春海, 董晓冰. 声学多普勒测流原理及应用研究[J]. 吉林水利, 2013(11): 17-19. ZHANG C H, DONG X B. Research of Acoustic Doppler Current theory and its application[J]. *Jilin Water Resources*, 2013(11): 17-19.

Field Measurement and Indoor Validation of Bottom Bed Elevation by Using High Frequency Acoustic Instrument

SUN Jian-xiong¹, ZHANG Wen-xiang¹, SHI Ben-wei^{1,2}, WANG Ya-ping¹, HUANG Yuan-guang¹

(1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*

2. *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: Change of erosion and deposition of bottom bed in the estuarine and coastal areas is one of the main research contents of sedimentation dynamics, and field observation is the key to obtain accurately the information about changes of scour and silting of the bottom bed. For the in-situ measurement of bed elevation variations in the southern channel of the Yangtze River mouth, an Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) instrument, which is used to observe 3D hydrodynamic information of near-bottom boundary layer, is applied. In order to verify the reliability of the measured data in the field, two indoor experiments are designed for verifying the feasibility of the bed elevation measured by using ADV: Experiment 1 is to determine the range of the bottom-bed elevation measured with ADV by comparing the distance from ADV transmitting transducer to bottom bed measured artificially H with that recorded by ADV itself h ; and Experiment 2 is to determine the influence of sediment concentration on ADV measurements through measuring the static high turbidity water with ADV. The experimental results show that: ① The distance from the ADV transducer to the bottom bed can be directly acquired through the vhd data file stored inside ADV. However, the results thus measured require the actual height H between the transducer and the bed satisfying $150\text{ mm} \leq H \leq 370\text{ mm}$; ② When the actual height H between the transducer and the bed is less than 150 mm, the actual height H can be obtained by extracting the pck data file; ③ When the actual height H is greater than 370 mm, the instrument cannot obtain the value; and ④ When the sediment concentration exceeds 14.36 kg/m^3 , there is also no way to obtain the information about actual height H in the ADV measurement.

Key words: ADV; bottom bed elevation; echo intensity; bottom bed scour and silting

Received: December 23, 2021