

刘保华, 孟祥梅, 陈木俊, 等. 南海北部陆架底质声学原位测量及中频声速特征[J]. 海洋学报, 2026, 48(x): 1–9, doi:

LIU Baohua, MENG Xiangmei, CHEN Mujun, et al. In-situ geoacoustic measurement in the northern continental shelf of South China Sea and characteristics of mid-frequency sound speed[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(x): 1–9, doi:

南海北部陆架底质声学原位测量及中频声速特征

刘保华^{1,2*}, 孟祥梅³, 陈木俊⁴, 阚光明^{3*}

(1. 崂山实验室, 青岛 266237; 2. 国家深海基地管理中心, 青岛 266237; 3. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质地球物理研究室, 青岛 266061; 4. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 青岛 266100)

摘要: 本文首先简要介绍了基于高频微振动贯入技术的底质声学原位测量系统, 该系统由机械液压、声学换能器、声波发射采集、总体控制和辅助测量等单元组成, 可以用于海底沉积物的中频声速和声衰减系数的原位测量。2025 年 4 月, 该系统搭载“向阳红 01”号科考船在我国南海北部陆架开展了 9 个站的底质声学原位测量, 其中 8 个站的最大贯入深度超过 3 m, 频率覆盖范围 1.6 kHz~10.0 kHz。计算表明, 9 个站的声速特征差别明显: 第一组 3 个站的声速比在 1.01~1.03 之间变化, 第二组 4 个站的声速比明显小于 1.0, 介于 0.97~0.98 之间, 第三组的两个站的声速比介于前面两组之间, 声速比在 1.0 附近。与同步获得的沉积物柱状样对比发现, 声速特征与沉积物的物理性质参数有高度的相关性, 当含砂量较高和含水率较低时沉积物的声速大于近底海水的声速, 当含砂量较低和含水率较高时沉积物的声速则低于近底海水的声速, 含砂量和含水率可能是决定沉积物声速是大于还是小于近底海水声速的主要因素。9 个站中, 粒径较大 ($\Phi=4.6\sim 4.7$) 的沉积物中声速频散约为 2%, 而粒径较小 ($\Phi=5.8\sim 5.9$) 的沉积物中频散不到 1%。另外, 利用 Hamilton 模型预测的各站的声速比原位测量结果高出 3.5%~8%, 并且预测值均大于近底海水的声速。

关键词: 南海北部陆架; 底质声学; 原位测量; 中频; 声速特征

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2026)x-0001-09

1 引言

海底沉积物的声学特性参数主要包括声速、声衰减系数、密度和声阻抗等, 其中声速和声衰减系数是两个最为重要的参数。由于声速和声衰减系数对声波频率的依赖性, 海底沉积物的声学特性分为高频、中频和低频声学特性^[1]。其中, 高频声学特性通常指 10 kHz 以上声波的声速和声衰减系数。目前, 高频声学特性参数的获取相对容易, 其测量方式主要分为实验室测量和原位测量两大类^[2-14]。海底沉积物的中频声学特性一般指的是 1 kHz~10 kHz 声波的声速和声衰减系数等。由于受沉积物样品尺寸等因素的影响, 实

验室测量方法无法获得中频声学特性, 原位测量是目前获得海底沉积物的中频声学特性最为可行的方法。

中频声学特性原位测量最早的尝试开始于上世纪 90 年代末, Fu 等人^[15]开发了“声学长矛”系统, 并在大西洋中脊开展了 5 个站位的原位测量。该装置由固定在重力取样器上的宽频声源 (3 kHz~20 kHz) 和多个接收换能器组成, 测量深度可达海底以下 5 m。通过对比各个接收换能器接收到声学信号的到达时间和振幅差异, 得到了海底沉积物的平均声速和声衰减系数, 并发现原位测量结果与实验室测量结果存在显著差异^[16]。本世纪初, Hines 等人^[17]在 SAX04 (2004 Sediment Acoustic Experiment) 声学实验中设计了一套

收稿日期: 2026-03-04; 修订日期: 2026-05-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (U2006202, 42327901); 国家重点研发计划项目 (2021YFF0501200)。

* 通信作者: 刘保华 (1960—), 男, 山东省嘉祥县人, 研究员, 主要从事海洋地球物理和底质声学研究。E-mail: bhliu@ndsc.org.cn; 阚光明 (1982—), 研究员, 主要从事底质声学调查和研究。E-mail: kanguangming@fio.org.cn

复杂的原位测量系统,包括埋在海底沉积物中的两个发射换能器和 4 个接收换能器,以及位于水体中的 1 个发射换能器和 1 个水听器。测量结果显示沉积物声速比从 600 Hz 时的 1.05 增加到 20 kHz 的 1.13,比 SAX99(1999 Sediment Acoustic Experiment)测得的声速比低 3%,并分析了产生差异的原因。SAMS(Sediment Acoustic-speed Measurement System)^[18]可以说是第一台真正可用于中频底质声学调查的原位测量装置,由美国华盛顿大学应用物理实验室研制。该系统由三脚架、探杆贯入、发射-接收换能器和采集控制等单元组成,其中探杆贯入方式是利用高压水流排开沉积物驱动探杆贯入,声源由 1 个低频和 9 个中频换能器组成,发射频段可以覆盖 1 kHz~10 kHz 的频率范围。环形接收换能器安装在探杆的底部,可以随探杆贯入到海底之下 3 m 深度。该系统在 SBCEX17 和 TREX13 等声学实验中获得了 2 kHz~10 kHz 频段的海底沉积物的声速和声衰减系数,并发现泥质沉积中声速比为 0.98~1.0,声速频散不显著^[19]。

本文利用新研制的基于高频微振动贯入技术的底质声学原位测量系统 SAS(Sediment Acoustic Survey,以下简称 SAS),于 2025 年 4 月在我国南海北部陆架首次开展了中频底质声学原位调查(图 1),获得了 9 个站(表 1)的底质声学原位测量数据,并同步进行了海底沉积物取样等。经过数据处理,提取了各站的中频(1.6 kHz~10.0 kHz)声速(比),分析了声速变化规律和频散特征,讨论了海底沉积物的物理性质与声速变化和频散的关系。

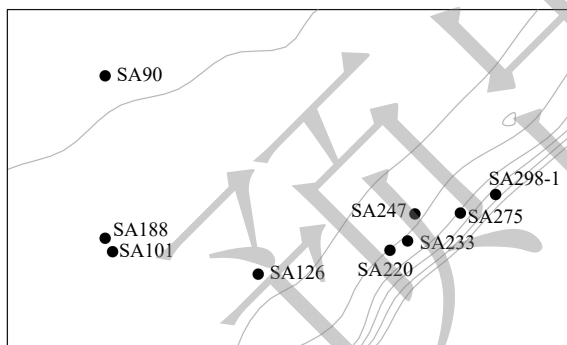


图 1 研究海区海底地形和站位分布图

Fig. 1 Topography of the study area and station distribution.

2 测量装置与数据获取

2.1 测量装置简介

SAS 系统采取透射原理(time-of-flight)^[17]和斜向测量方式^[18]。其中,“透射原理”指的是发射和接收换能器均置于海底沉积物中,已知发射和接收换能器之

表 1 SA101 等测站相关信息

Table 1 Related information of SA101 and other stations

站位序号	站位名称	最大贯入深度/m	近底海水声速(m/s)	水深/m
1	SA101	3.30	1 524.5	103
2	SA90	3.25	1 523.9	101
3	SA188	2.54	1 517.3	116
4	SA233	3.31	1 515.9	174
5	SA220	3.35	1 515.2	149
6	SA298-1	3.28	1 501.0	336
7	SA247	3.29	1 516.6	135
8	SA275	3.24	1 515.5	294
9	SA126	3.30	1 516.8	183

间的距离,通过测量发射声波经过在沉积物中传播后到达接收换能器的时间,获得海底沉积物的声速参数;“斜向测量方式”是指把发射换能器置于海底且离开探杆一定距离,从而增加发射和接收换能器的距离。依据上述原理,该系统设计由机械液压、声学换能器、声波发射采集、总体控制和辅助测量等单元组成(图 2)。

机械液压单元由主体框架、探杆贯入、液压驱动和扩展臂等功能模块组成。主体框架承载着包括液压驱动、探杆贯入和扩展臂等单元以及其他单元的硬件部分,其次作为保护框架防止装置在释放和回收过程中与船舷等其他物体发生碰撞。主体框架外形设计为六棱柱形,总体高度为 4.5 m。探杆贯入模块由振动电机、声学探杆和深度计数器等组成。高频振动电机作为探杆贯入的动力来源,不仅提高了探杆的贯入深度和速度,而且减小了振动对声学探杆周围沉积物的扰动。声学探杆选用不锈钢管,长度 3.20 m、外径 89 mm,内置外径 50 mm 的取样管,可以同步进行沉积物取样。深度计数器负责记录探杆的贯入深度,精度 ± 1 mm。探杆提升的动力源来自于液压驱动模块,负责把探杆从海底沉积物中拔出,还可以根据控制命令把探杆下放或提升至任何位置。扩展臂是发射换能器的支撑机构,在装置释放和回收时收起,坐底后放置于海底并与探杆保持垂直状态,扩展臂的顶端到探杆轴线的垂直距离是 2 m。

声学换能器子系统由发射换能器和接收换能器组成。其中,发射换能器包括 1 个低频、1 个中频和 5 个高频发射换能器。低频发射换能器采用弯张换能器结构设计,可以覆盖 1 kHz~5 kHz 频率范围的发射

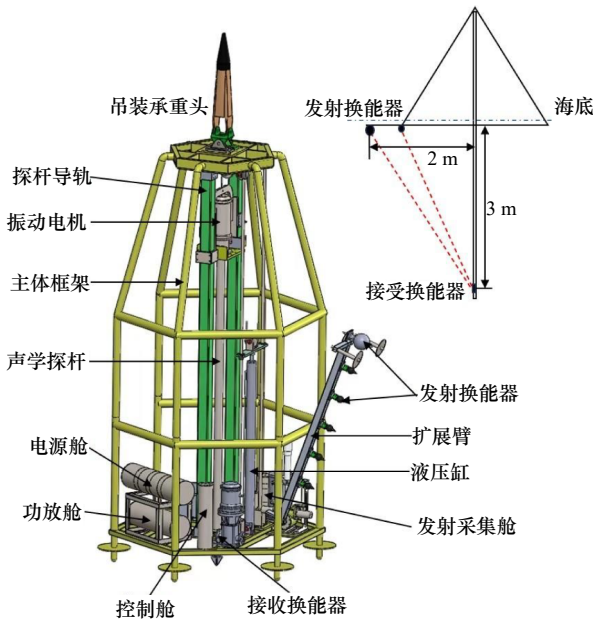


图 2 SAS 测量原理图和总体设计图

Fig. 2 SAS's schematic diagram of measurement principle and general assembly drawing

右上角小插图代表系统的几何关系和测量原理。其中, 发射换能器安装在扩展臂上, 扩展臂顶端距探杆轴线 2 m; 接收换能器位于探杆的下端, 距探杆顶端 3 m。红色虚线代表声线传播路径, 蓝色点划线代表海底, 扩展臂位于海底之下表示系统沉入海底沉积物中。

The schematic of geometry in the upper right corner represents the time-of-flight measurement principle of the system. Specifically, the transducers are mounted on an extended arm, 2 m from the axis of the probe; the receiver is mounted at the lower end of the probe, 3 m from the top of the probe. The red dashed line indicates the sound ray path, and the blue dash-dot line represents the seafloor. The extended arm being below seafloor indicates that the system sinks into the soft sediment.

频段; 中频和低频换能器均设计为球形换能器结构, 球形压电陶瓷直径分别为 150 mm 和 60 mm, 工作频段分别为 3.15 kHz~12.5 kHz 和 6 kHz~20 kHz; 通过分段组合的方式, 形成可以覆盖 1 kHz~20 kHz 频率范围的发射频段。宽频接收换能器在工作频段内 (1 kHz~20 kHz) 的接收灵敏度优于 -196 dB, 接收换能器设计成环形结构, 安装在探杆的下端, 随探杆贯

入海底沉积物中。

声波发射采集单元硬件部分包括基于 FPGA 处理器的控制、声信号生成、功率放大和声信号采集等电路, 软件系统通过上位机和下位机软件之间的配合实现对上述硬件单元的控制, 完成声信号的发射、采集和存储。总体控制单元也是由硬件单元和软件系统组成, 主要目的是实现对机械液压、声学发射采集和辅助测量等子系统的运行进行控制, 包括探杆贯入、扩展臂收放、发射采集启动, 以及向甲板单元发送上行信息, 实现视频图像、传感器数据、设备状态和声学探测数据的上传等。

辅助测量单元由摄像机、深度传感器、角度传感器和温盐深剖面仪 (CTD) 等组成。其中, 摄像机安装在支撑框架的中部, 甲板操作人员可以实时观察装置释放、测量和回收过程。角度传感器安装在扩展臂上, 负责监视装置坐底后倾斜的角度, 从而提醒操作人员海底地形是否满足开展原位测量的条件。另外, CTD 安装在支撑框架的中部, 可以全程测量海水的声速。

2.2 数据获取

如前所述, 原位测量需要分别在海底沉积物和近底海水中测量声波的到达时间和声压变化。本次测量中, 首先将装置放置于海底, 启动振动电机驱动探杆贯入沉积物中, 当探杆到达设计深度后, 振动电机停止工作并启动声波发射/接收指令, 三类发射换能器按照预设频率 (表 2) 先后发射充填 10 个周期的 CW 脉冲。接收换能器接收到来自发射换能器的声信号并完成机电转换, 采集模块完成 A/D 转换和数据记录 (采样频率为 5 MHz, 记录长度为 20 ms), 海底沉积物中测量过程就此结束。然后, 液压驱动模块把探杆从海底沉积物中提起, 甲板绞车把装置提升至离开海底约 5 m 高度, 液压驱动模块再次把探杆下放到探杆在沉积物中相同的深度, 并重复上述发射/接收过程, 得到近底海水中的测量结果, 该站原位测量结束。

表 2 三类发射换能器的发射频率

Table 2 The transmitting frequencies of three types of transducers.

低频换能器 (kHz)	1	1.6	2	2.5	3.15	4	5									
中频换能器 (kHz)					3.15	4	5	6.3	7	8	9	10	12.5			
高频换能器 (kHz)								6.3	7	8	9	10	12.5	16	20	

本次原位测量调查共设计了 9 个站位, 在测量过程中有 8 个站的最大贯入深度超过 3 m, SA188 站在 2 m 深度因探杆贯入过程缓慢, 由操作人员发出停止

贯入指令结束测量, 判断可能是遇到岩块或大型贝壳等。由于海底表层沉积物较软, 发射换能器全部被埋入沉积物中, 根据摄像机返回的视频图像估计发射换

能器中心位于海底表面以下 0.3~0.4 m。

图 3(a)和图 3(b)分别是 SA101 和 SA247 两个站在海底沉积物中(红色)和近底海水中(蓝色)接收到的不同频率的声信号数据。其中, 2 kHz 和 4 kHz 对应的声信号由低频换能器发射, 6.3 kHz 和 8 kHz 对应的声信号由中频换能器发射。为了方便对比, 红色代表在海底沉积物中测得的声信号, 蓝色代表在近底海水中测得声信号, 并且声信号的振幅进行了归一化处理。从图 3 可以看出:(1)不论是在沉积物中还是在近底海水中, 接收到的声信号均很好地保留了发射脉冲的正弦波特征, 波形畸变较小;(2)声信号的信噪比

较高, 不存在支撑框架等引起的反射和散射等干扰;(3)SA101 站沉积物中声波到达时间早于近底海水中声波到达时间, 说明沉积物中声速大于近底海水的声速, SA247 站则相反, 在所有频点上沉积物中声波到达时间都迟于近底海水中声波到达时间, 说明沉积物中声速小于近底海水的声速;(4)声波在海底沉积物中与近底海水中到达时差在第 2~9 个周期内比较稳定, 在进行相关分析时利用了多个周期信号来消除随机噪声的影响。因此, 适当增加发射脉冲的周期数可以提高时差的计算精度。

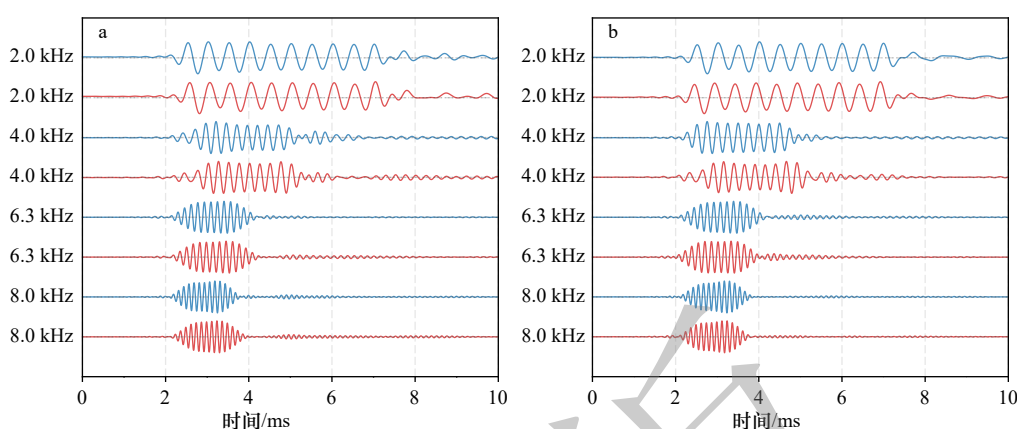


图 3 SA101 和 SA247 站海底沉积物中和近底海水中接收信号波形图。其中, 2 kHz 和 4 kHz 来自低频声源, 6.3 kHz 和 8 kHz 来自中频声源。红色代表在沉积物中测得的声信号, 蓝色代表在近底海水中测得的声信号。

声信号幅值进行了归一化处理。

Fig. 3 Received signals waveform diagram obtained in sediment and seawater near the seafloor at station SA101 and SA247. Specifically, 2 kHz and 4 kHz data are from the low-frequency transducer, 6.3 kHz and 8 kHz data are from the mid-frequency transducer. Red represents sound signals measured in sediments, blue represents sound signals measured in near the seafloor seawater. Signal amplitudes are normalized with reference to one.

3 声速特征

3.1 声速计算方法

假设在海底沉积物中和近底海水中测得的声波到达时间分别是 t_s 和 t_w , 由下式可以计算出海底沉积物的声速(比)^[20, 21]:

$$c_s = \frac{C_w}{1 - (\Delta t \times C_w)/r} \text{ 或 } \frac{C_s}{C_w} = \frac{1}{1 - (\Delta t \times C_w)/r} \quad (1)$$

其中: $\Delta t = t_w - t_s$, 通过两次测得声信号的互相关求得; $r = c_w \times t_w$ 代表发射和接收换能器之间的等效距离, c_w 为近底海水的声速, 由搭载在系统上的 CTD 测得。 $c_s (c_s/c_w)$ 代表最大贯入深度以上沉积层的平均声速(比)。然后, 利用 3 点圆滑对上式计算结果进行滤波处理, 得到滤波后的声速(比)变化趋势(图 4)。误差定义为声速(比)的计算值相对变化趋势的偏离情况。

3.2 声速特征

这里用海底沉积物的声速与本站近底海水声速的比值作为海底沉积物的声速特性。图 4 是全部 9 个站的声速比随声波频率的变化曲线, 为了清晰目的, 误差没有在图中标出, 而是在后面图中给出。根据声速比的大小和变化等特征, 这 9 个站大致可以分成三组, 第一组为 SA101、SA90 和 SA188 站, 其声速比明显大于 1.0, 比值介于 1.01~1.03 之间; 第二组为 SA233、SA220、SA298-1 和 SA247 站, 其声速比明显小于 1.0, 比值在 0.97~0.98 之间变化; 第三组为 SA275 和 SA126 站, 其声速比介于前两组之间, 声速比在 1.0 附近。下面结合海底沉积物的物理性质(表 3)对声速特征进行分析和讨论。

(1) SA101、SA90 和 SA188 站

SA101、SA90 和 SA188 站位于测区的西侧, 水深在 100 m 左右, 探杆贯入深度分别是 3.30 m、3.25 m

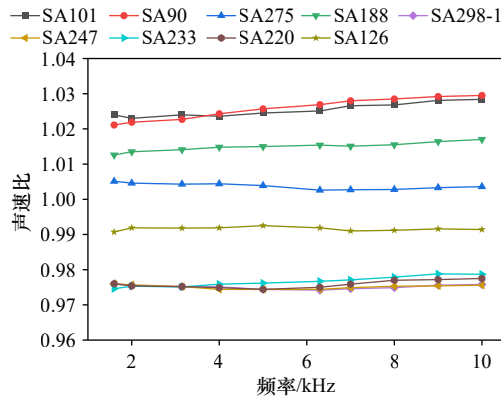


图 4 SA101 等站海底沉积物/近底海水的声速比

Fig. 4 Sound speed ratios of the sediments to the near-seafloor seawater at nine stations, including the SA101.

横轴代表测量声波的频率, 单位 kHz; 纵轴代表沉积物的声速与近底海水的声速之比。

The horizontal axis represents the frequency of the sound waves in kHz; the vertical axis represents the sound speed ratio of the sediments and seawater near the seafloor.

和 2.54 m。SA101 站沉积物中除少量黏土外, 砂和粉砂各约占 45%; SA90 站沉积物含砂量最高 (56.4%), 粉砂和黏土含量分别为 27.0% 和 16.6%; SA188 站沉积物中砂的含量减少 (35.7%), 黏土含量增加, 达到 19.6%。其中, SA101 和 SA90 站不论是湿密度、孔隙度和含水率, 还是含砂量和平均粒径都比较接近, 而 SA188 站沉积物的湿密度、孔隙度和平均粒径与前两个站存在系统性偏差。

从图 5 看出, SA101 和 SA90 两个站的声速比非常接近, 在低频段约为 1.022, 然后逐渐升高, 到 10 kHz~10.0 kHz 频段声速比达到 1.03, 在测量频段内上升趋

势较为显著, 说明声速存在频散现象; SA188 站的声速比在低频段约为 1.013, 在 10 kHz~10.0 kHz 频段声速比接近 1.017, 总体也呈上升趋势, 但是声速比和频散明显小于前面两个站。对比 3 个站的沉积物物理性质, 可以看出声速特征与沉积物物理参数有高度的相关性, 即湿密度、含砂量和平均粒径与声速 (频散) 呈正相关关系, 孔隙度和含水率与声速 (频散) 呈负相关关系。

(2) SA233、SA220、SA298-1 和 SA247 站

SA233、SA220、SA298-1 和 SA247 站位于测区的东侧, 水深超过 100 m, 其中 SA298-1 站水深达到 336 m, 探杆贯入深度分别是 3.31 m、3.35 m、3.28 m 和 3.29 m。SA233 站沉积物类型以砂质粉砂为主, 但是沉积物中含砂量高于其他 3 个站, 含水率则低于其他 3 个站。除 SA233 站外, 其他 3 个站的湿密度、含水率、含沙量和平均粒径等均比较接近。

总体来看 (图 6), 4 个站最显著的特征是沉积物声速比均小于 1.0, 平均声速比在 0.975 左右, 即沉积物的声速值约等于 1 480 m/s, 明显低于近底海水的声速 1 515 m/s; 声速比在测量频段内变化很小 (小于 0.5%), 几乎不存在频散现象。从细节上看, 4 个站的沉积物声速比还是有所不同, 主要表现在 4 个站的声速比变化上, 在 2 kHz 附近 4 个站的声速比略大于 0.975, 随着频率增大, 声速比呈下降趋势, 最低出现在 5 kHz~6 kHz 频段, 然后呈缓慢增大趋势, SA233 和 SA220 站的声速比增加稍快一些, 在高频段接近 0.98, 其他两个站在 0.976 上下, 几乎没有增大。4 个站的声速特征与沉积物物理性质有较好的相关性, 例

表 3 SA101 等站沉积物柱状样的主要物理性质参数

Table 3 Main physical property parameters of sediment core samples from SA101 and other stations.

站位	湿密度*(g/cm ³)	孔隙度*(%)	含水率*(%)	砂*(%)	粉砂*(%)	黏土*(%)	平均粒径*(Φ)	沉积物类型
SA101	1.83	0.51	40.5	44.7	46.8	8.5	4.60	砂质粉砂为主
SA90	1.87	0.49	48.3	56.4	27.0	16.6	4.73	粉砂质砂为主
SA188	1.79	0.54	43.7	35.7	44.7	19.6	5.08	砂质粉砂夹粉砂质砂
SA233	1.72	0.60	59.6	19.2	67.8	13.0	5.57	砂质粉砂为主
SA220	1.66	0.62	60.7	13.7	72.4	13.9	5.88	黏土质粉砂和砂质粉砂
SA298-1	1.67	0.62	60.1	14.6	69.4	15.7	5.87	砂质粉砂为主
SA247	1.70	0.62	68.6	14.9	71.3	13.8	5.81	砂质粉砂为主
SA275	1.83	0.52	43.2	39.1	50.6	10.3	5.50	砂质粉砂为主
SA126	1.69	0.60	57.9	9.9	76.4	13.8	5.64	粉砂为主

注: *代表贯入深度之上各层沉积物相应物理参数的平均值, 例如湿密度*代表某站贯入深度之上各层沉积物湿密度的平均值; 平均粒径采用 Krumbein (1934) 提出的以 2 为底的对数来表征, 即 $\Phi = -\log_2 d$, d 是沉积物颗粒的直径, 单位为 mm。

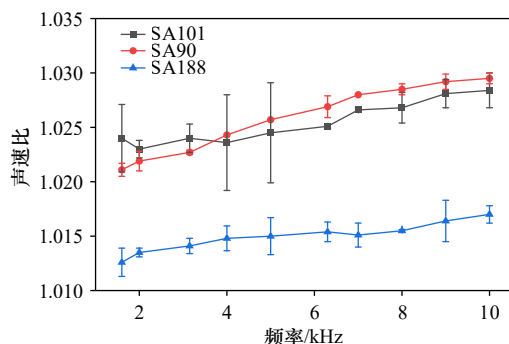


图5 SA101、SA90和SA188站海底沉积物/近底海水的声速比

Fig. 5 Sound speed ratios of the sediments to the near-seafloor seawater at SA101, SA90, and SA188 stations.

横轴代表测量声波的频率, 单位 kHz; 纵轴代表沉积物的声速与近底海水的声速之比。

The horizontal axis represents the frequency of the sound waves in kHz; the vertical axis represents the sound speed ratio of the sediments and seawater near the seafloor.

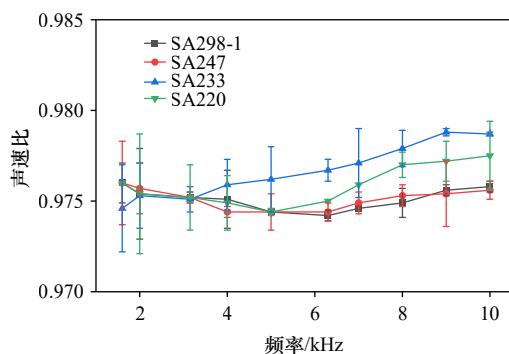


图6 SA233、SA220、SA298-1和SA247站海底沉积物/近底海水的声速比

Fig. 6 Sound speed ratios of the sediments to the near-seafloor seawater at SA233, SA220, SA298-1 and SA247 stations.

横轴代表测量声波的频率, 单位 kHz; 纵轴代表沉积物的声速与近底海水的声速之比。

The horizontal axis represents the frequency of the sound waves in kHz; the vertical axis represents the sound speed ratio of the sediments and seawater near the seafloor.

如 SA233 站相对高的声速可能与其偏高的湿密度、含砂量和较大的粒径有关, 而 SA247 和 SA298-1 站稍低的声速比和频散与其高含水率、低含沙量和较小的粒径保持一致。

(3) SA275 和 SA126 站

SA275 站位于测区的东部, 水深接近 300 m, SA126 站则位于测区的南部, 水深 183 m, 探杆贯入深度分别是 3.24 m 和 3.30 m。SA275 站的沉积物类型以砂质粉砂为主, SA126 站的沉积物类型以粉砂为主。除粒径小于 SA101 外, SA275 站沉积物的其他物理性质参数与 SA101 站非常接近。

从图 7 看出, 该组两个站的声速比总体介于第一组和第二组之间, 在测量频带范围内都没有明显的频散现象。差别体现在 SA275 站的声速比在全频段大于 1.0, 小于 1.005, SA126 站的声速比在全频段小于 1.0, 略大于 0.99。对比两个站的沉积物物理性质发现, 除孔隙度和含水率外, SA275 站沉积物的湿密度、含砂量和平均粒径均大于 SA126 站, 应该呈现高的声速特征, 从组内看这两个站的声速特征与沉积物的物理性质是一致的。然而与第一组 3 个站对比发现, SA275 站的声速比和频散明显偏低, 与其沉积物的物理性质不符, 究竟是测量误差还是其他原因所致有待进一步调查和研究。

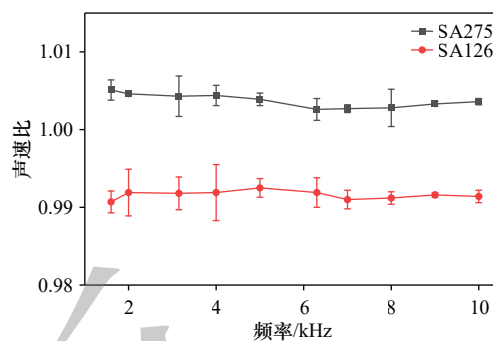


图7 SA275和SA126站海底沉积物/近底海水的声速比

Fig. 7 Sound speed ratios of the sediments to the near-seafloor seawater at SA275 and SA126 stations.

横轴代表测量声波的频率, 单位 kHz; 纵轴代表沉积物的声速与近底海水的声速之比。

The horizontal axis represents the frequency of the sound waves in kHz; the vertical axis represents the sound speed ratio of the sediments and seawater near the seafloor.

4 讨论

(1) 关于测量精度: 由于国内外尚无此类装置的检定设施, 目前对原位测量结果精度难以做出定量的评价^[20], 但是可以从误差来源和实际测量结果两个方面对其进行定性分析: 首先从主要误差来源看(公式 1), 在假设 CTD 测得的海水声速是准确的前提下, 误差主要来自发射和接收换能器之间的等效距离 r 和沉积物中与近底海水中接收到的声波到达时间差 Δt 。其中, 等效距离 r 的误差主要来自近底海水中声波的初始到达时间 t_w 。为了避开初始到达时间识别难的问题, 本文转而识别后续周期开始的时间, 经校正后作为初始到达时间 t_w 。关于 Δt 的误差主要来自于声波信号的畸变, 本文在进行相关分析时, 通过对声波信号进行截断处理, 切除波形畸变较大的第一个和第十个周期信号, 明显提高了 Δt 的计算精度^[21]。其次

从 9 个站计算得到的声速来看, 它们与沉积物物理性质保持了高度的一致性, 沉积物物理参数系统性变化在声速特征上都有明显的表现, 说明原位测量结果是可信的。

(2) 关于声速变化: 对比三个组可以看出, 声速特征有明显差别: 第一组 3 个站的声速比在 1.01~1.03 之间变化, 海底沉积物的声速高出近底海水的声速约 15 m/s~45 m/s; 第二组 4 个站的声速比明显小于 1.0, 比值在 0.97~0.98 之间变化, 海底沉积物声速明显低于近底海水的声速 30 m/s~45 m/s; 第三组的两个站的声速比介于前面两组之间, 声速比在 1.0 附近, 与近底海水的声速非常接近。从沉积物类型上看, 第一组湿密度、含砂量和平均粒径最大, 孔隙度和含水率最小; 第二组湿密度、含砂量和平均粒径最小, 孔隙度和含水率最大; 第三组则介于上面两组之间。组与组之间沉积物物理性质的系统性差异在声速和频散上均有显著的体现。另外, 对比 9 个站沉积物的声速特征和物理性质, 可以推断含砂量和含水率可能是决定沉积物声速是大于还是小于近底海水声速的主要因素。Yang 等人^[19]在进行原位测量时也发现随着沉积物含砂量的减少和泥质含量的增加, 声速比由 1.1 逐渐减小到 0.98 左右 (2 kHz~10 kHz)。甚至在 25 kHz~200 kHz 频段范围也有声速比低于 1 的现象^[22]。

(3) 关于声速频散: Kimura^[23]通过实验和理论分析研究了高频声波 ($f \geq 200$ kHz) 的声速频散问题, 发现当 $kd \leq 0.5$ 时 (k : 海水中声波波数, d : 沉积物粒径) 频散表现为正值, 但是随着频率的降低和粒径变小, 声速频散呈下降趋势。关于中低频声波的频散问题, 由于实验难度大增, 目前国内外还没有相关的报道。不过可以推测, 当频率足够低且粒径足够小时 ($kd \ll 0.5$), 频散应该趋于 0。本文 9 个站中, 粒径较大的砂质沉积中声速频散小于 2%, 而粒径较小的粉砂质沉积中频散不到 1%, 其趋势与上述实验和理论研究结论是吻合的。

(4) 关于预测模型: Hamilton 等人^[24-26]根据大量实验室测量数据和部分高频原位测量结果, 建立了海底沉积物声速与沉积物物理性质参数 (湿密度、孔隙度和平均粒径) 之间的二阶多项式回归方程或称为 Hamilton 声速预测模型。为了检验预测模型在我国南海海域的适应性, 把 9 个站的湿密度、孔隙度和平均粒径代入这些方程, 得到声速比的预测值 (表 4)。可以看出预测值明显大于实测值, 其中, 利用湿密度参数得到的预测值普遍大于实测值 3.5%, 利用粒径参数得到的声速预测值与实测值偏差最大, 比实测声速高出 50 m/s~120 m/s, 并且预测值均大于海水的声速。分析其原因可能有两个: 一是 Hamilton 等人的声速测量数据主要来自实验室测量结果, 测量频率一般大于 50 kHz, 部分测量频率甚至高达 400 kHz; 二是数据来自全球众多海域和不同类型的沉积物。大样本数据使得预测模型具有较好的普适性, 但是在预测精度上会有很大的局限性。

5 结论

(1) SAS 是国内第一台可用于海底沉积物中频声速和声衰减系数测量的原位测量系统, 由机械液压、声学换能器、声波发射采集、总体控制和辅助测量等单元组成。2025 年 4 月, 该系统搭载“向阳红 01”号科考船在我国南海北部陆架开展了 9 个站的底质声学原位测量, 除 SA188 站外, 其他 8 个站的最大贯入深度均超过 3 m, 频率覆盖范围 1.6 kHz~10.0 kHz。在这 9 个站位同步进行了柱状沉积物取样。

(2) 计算表明, 9 个站的声速特征有明显差别: 第一组 3 个站的声速比在 1.01~1.03 之间变化, 海底沉积物的声速比近底海水声速高出 1%~3%; 第二组 4 个站的声速比明显小于 1.0, 在 0.97~0.98 之间变化, 海底沉积物的声速低于近底海水声速 2%~3%; 第三组两个站的声速比介于前两组之间, 声速比在 1.0 附近。声速特征与沉积物类型和物理性质参数有高度的相关性, 当含砂量较高和含水率较低时沉积物

表 4 利用 Hamilton 模型得到的 9 个站的沉积物声速比预测值与本次调查实测值

Table 4 Predicted sound speed ratio of the sediments by Hamilton formulas and measured sound speed ratio of this survey at 9 stations

站位	SA101	SA90	SA188	SA233	SA220	SA298-1	SA247	SA275	SA126
本次调查实测值	1.026	1.026	1.015	0.968	0.976	0.975	0.975	1.004	0.992
密度公式	1.062	1.076	1.050	1.025	1.016	1.018	1.025	1.062	1.023
孔隙度公式	1.066	1.083	1.054	1.027	1.022	1.022	1.020	1.062	1.027
粒径公式	1.077	1.074	1.068	1.056	1.048	1.058	1.049	1.066	1.053

的声速大于近底海水的声速,当含砂量较低和含水率较高时沉积物的声速则低于近底海水的声速,含砂量和含水率可能是决定沉积物声速是大于还是小于近底海水声速的主要因素。本文9个站中,粒径较大的砂质沉积中声速频散约为2%,而粒径较小的粉砂质沉积中频散不到1%。

(3)把9个站的湿密度、孔隙度和平均粒径分别

代入 Hamilton 声速预测模型,得到的沉积物的声速比预测值明显大于原位测量结果3%~8%,并且均大于近底海水的声速。说明 Hamilton 模型用于中低频声速预测有很大的局限性。因此,为了提高模型的普适性和预测精度,加强中频原位测量和数据积累,分频段和分沉积物类型建立相应的预测模型,应该在今后调查和研究工作中予以重视。

参考文献:

- [1] 刘保华, 阚光明, 李官保, 等译. 高频海底声学[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
Liu Baohua, Kan Guangming, Li Guanbao, et al. High-Frequency Seafloor Acoustics[M]. Beijing, Ocean Press, 2014.
- [2] Hamilton E L, Shumway G, Menard H W, et al. Acoustic and other physical properties of shallow-water sediments off San Diego[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28: 1-15.
- [3] Shumway G. A resonant chamber method for sound speed velocity and attenuation measurements in sediments[J]. *Geophysics*, 21: 305-319.
- [4] Hamilton E L. Sediment sound velocity measurement made in-situ from bathyscaph Trieste[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68: 5991-5998.
- [5] Hampton L D. Acoustic properties of sediments[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1967, 42: 882-890.
- [6] E. L. Hamilton, H. P. Buckner, D. L. Keir, and J. A. Whitney, "Velocities of compressional and shear waves in marine sediments determined in situ from a research submersible[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75: 4039-4049.
- [7] Anderson A L, Hampton L D. Acoustics of gas-bearing sediments I. Background[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 67: 1865-1889.
- [8] Anderson A L, Hampton L D. Acoustics of gas-bearing sediments II. Measurements and models. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 67: 1890-1903.
- [9] Hamilton E L. Sound velocity as a function of depth in marine sediments[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, 78: 1348-1355.
- [10] 陶春辉, 金肖兵, 金翔龙, 等. 多频海底声学原位测试系统研制和试用[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 46-50.
Tao Chunhui, Jin Xiaobing, Jin Xianglong, et al. Development of multi-frequency in-situ marine sediment geoacoustic measuring system[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2): 46-50.
- [11] 郭常升, 窦玉坛, 谷明峰. 海底底质声学性质原位测量技术研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(8): 6-10.
Guo Changsheng, Dou Yutan, Gu Mingfeng, et al. Development of in situ marine sediment acoustic measurement technique[J]. *Experiment & Technology, Marine Science*, 2007, 31(8): 6-10.
- [12] 阚光明, 刘保华, 韩国忠, 等. 原位测量技术在黄海沉积声学调查中的应用[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 88-94.
Kan Guangming, Liu Baohua, Han Guozhong, et al. Application of in-situ measurement technology to the survey of seafloor sediment acoustic properties in the Huanghai Sea[J]. 2010, 32(3): 88-94.
- [13] 侯正瑜, 郭常升, 王景强, 等. 一种新型海底沉积物声学原位测量系统的研制及应用[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 1976-1984.
Hou Zhengyu, Guo Changsheng, Wang Jingqiang, et al. Development and application of a new type in-situ acoustic measurement system of seafloor sediments. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(6): 1976-1984.
- [14] 王景强, 郭常升, 李会银. 声学原位测量系统在胶州湾的测量试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(3): 75-80.
Wang Jingqiang, Guo Changsheng, Li Huiyin. The experiment study of in-situ acoustic measurement system in Jiaozhou Bay. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(3): 75-80.
- [15] Fu S S, Frazer L N. Acoustic lance: New in situ sea floor velocity profiles[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 99: 234-242.
- [16] Fu S S, Wilkens R H, Frazer L N. In situ velocity profiles in gassy sediments: Kiel Bay[J]. *Geo-marine Letters*, 1996, 16: 249-253.
- [17] Hines P C, Osler J C, Scrutton G E, et al. Time-of-Flight Measurement of Acoustic Wave Speed in a Sandy at 0.6-20 kHz[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35: 502-515.
- [18] Yang J, Tang D J, Williams K L. Direct measurement of sediment sound speed in Shallow Water[J]. *Journal of the Acoustic Society of America*, 2008, 124: 116-121.
- [19] Yang J, Tang D J. Direct Measurements of sediment sound speed and attenuation in the frequency band of 2-8 kHz at the target and reverberation experiment site[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, 42: 1102-1110.
- [20] Briggs K, Richardson M D, et al. Variability in geoacoustic and related properties of surface sediments from the Venezuela Basin, California Sea[J]. *Marine Geology*, 1985, 68: 73-106.
- [21] Buckingham M J, Richardson M D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments[J]. *IEEE*

Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27: 429–453.

- [22] Ballard M S, Lee K M, et al. In Situ Measurement of Compression wave speed Dring Gravity Coring Operations in New England Mud Path[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44: 1–13.
- [23] M. Kimura, "Velocity dispersion and attenuation in granular in marine sediments: Compression of measurements with predictions using acoustic models[J]. *Journal of the Acoustic Society of America*, 2011, 129: 3544–3561.
- [24] Hamilton E L. Compression wave attenuation in marine sediments[J]. *Geophysics*, 1972, 37: 620–646.
- [25] Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. *Journal of the Acoustic Society of America*, 1980, 68: 1313–1340.
- [26] Bachman R T. Acoustic and physical property relationships in marine sediment[J]. *Journal of the Acoustic Society of America*, 1985, 78: 616–621.

In-situ geoacoustic measurement in the northern continental shelf of South China Sea and characteristics of mid-frequency sound speed

LIU Baohua^{1,2}, MENG Xiangmei³, CHEN Mujun⁴, KAN Guangming³

(1. *Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China*; 2. *National Deep Sea Research Center, MNR, Qingdao 266237, China*; 3. *Marine Geological and Geophysical Department, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*; 4. *Collage of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: This paper briefly introduces the in-situ geoacoustic measurement system (SAS), which is based on high-frequency micro-vibration penetration technology. The system is composed of mechanical-hydraulic units, acoustic transducers, an acoustic emission and acquisition unit, an overall control unit, and auxiliary measurement units. It is designed for measuring the mid-frequency sound speed and attenuation coefficient of seafloor sediments. In April 2025, the system was deployed aboard the R/V "Xiangyanghong 01" to conduct in-situ acoustic measurements at nine stations in the northern continental shelf of South China Sea. At eight of these stations, the maximum penetration depth exceeded 3 meters, covering a frequency range of 1.6 kHz -10.0 kHz. The calculated sound speed shows distinct differences among the nine stations: the sound speed ratio at the first group of three stations varies between 1.01 and 1.03; at the second group of four stations, the ratio is significantly less than 1.0, ranging between 0.97 and 0.98; and at the third group of two stations, the ratio lies between the previous two groups, around 1.0. Comparison with synchronously obtained sediment core samples reveals a high correlation between sound velocity characteristics and the physical property parameters of sediments. When the sand content is high and the water content is low, the sound velocity in sediments exceeds that of near-bottom seawater; when the sand content is low and the water content is high, the sound velocity in sediments is lower than that of near-bottom seawater. Sand content and water content may be the primary factors determining whether sediment sound velocity is greater or less than that of near-bottom seawater. Across the nine stations, sound speed dispersion is approximately 2% in coarser sandy sediments ($\Phi=4.6\sim 4.7$), but less than 1% in finer silty sediments ($\Phi=5.8\sim 5.9$). Furthermore, the sound speed ratios predicted using the Hamilton formulas for each station are 3.5% to 8% higher than the in-situ measurement results, with all predicted values exceeding the sound speed of the near the seafloor seawater.

Key words: Northern continental shelf of South China Sea; geoacoustics; in-situ measurement; mid-frequency; characteristics of sound speed