

菲律宾海深海海底沉积物声学特性与物理性质相关关系

孙志文^{1,2,3}, 孙 蕾³, 李官保^{3,4}, 阚光明^{3,4}, 郭常升^{1,2,4}, 王景强^{3,4}, 孟祥梅^{3,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 为研究深海海底沉积物声学特性与物理性质相关关系, 于 2016 年 11 月在实验室对水深 3 164~5 592 m 的菲律宾海深海海底沉积物柱状样品的声学特性进行测量, 获取了沉积物声速、声速比、声阻抗、声阻抗指数等声学特性参数。结合沉积物的孔隙度和密度等物理性质参数, 分析了海底沉积物声速、声速比、声阻抗、声阻抗指数与孔隙度、密度的相关关系, 建立了该海域海底沉积物声学特性回归方程。研究表明: 研究区深海数据与浅海回归方程符合度较差, 与深海回归方程符合度较好; Hamilton 校正方法有助于修正实验室测量引起的温度和压力误差, 声速比与 Hamilton 方程符合度比声速好; 声阻抗和声阻抗指数与物理性质参数的相关性优于声速和声速比。此外, 研究认为由于海底沉积物的沉积环境较为复杂, 其声学特性回归方程存在差异。由于上述差异的存在, 在使用基于不同海域数据建立的回归方程进行海底沉积物声学特性预测时, 应加以区别对待。该研究丰富了深海海底沉积物声学数据, 对促进深海海底沉积物声学深入研究具有一定的借鉴意义。

关键词: 声学特性; 物理性质; 海底沉积物; 深海; 回归方程

中图分类号: P733.23; P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2018)05-0012-11

DOI: 10.11759/hyxx20170616002

海底沉积物作为海洋资源的载体, 一直是海洋研究中的重点和难点, 其物理特性对海洋工程建设及油气资源开发具有重要意义, 其声学特性与海底探测和水声通信密切相关, 对海洋声场有重要影响。不同海底沉积物类型具有不同的物理性质和声学特性, 通过海底沉积物声学特性反演海底沉积物物理性质, 可为海洋工程开发、海底沉积物分类提供研究资料, 因此研究海底沉积物声学特性与物理性质相关关系具有非常重要的意义。目前获得海底沉积物声学特性的直接测量方法主要有两种: 原位测量和实验室测量^[1], 实验室测量是指在实验室环境下对获得的沉积物柱状样品进行声学特性的测量, 实验室测量具有实验设备简单, 成本低, 操作方便等优点。

海底沉积物声学特性与物理性质的相关关系是沉积声学的重要研究内容^[2~3], 得到了国内外学者大量关注。Hamilton^[4]利用在太平洋测试中得到的声速、孔隙度、密度等数据建立了大陆架和大陆坡沉积物、深海平原沉积物、深海丘陵沉积物的声学参数与物理性质的回归方程, 同时 Hamilton 等^[5]指出实验室声速测量与原位声速测量存在差异的主要原

因是温度和压力的改变, 并提出声速比的概念。Orsi 和 Dunn^[6]对南大西洋巴西盆地细粒深海沉积物的压缩波声速和孔隙度、密度、粒径含量、平均粒径相关关系进行了分析, 并给出了相应的回归方程。

1974 年, Anderson^[7]对大西洋、太平洋、印度洋、地中海的海底沉积物样品实验室声速与物理性质相关关系进行了系统的统计分析; 近年来国内沉积物声

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-07-24

基金项目: 海洋公益性行业科研专项项目(201405032); 国家自然科学基金项目(41330965, 41676055); 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放课题基金(MGE2016KG06); 南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2016-03-03); 泰山学者工程专项经费项目(TSPD20161007)

[Foundation: Special Research Projects of Marine Welfare Industry, No. 201405032; National Natural Science Foundation of China, No. 41330965, No. 41676055; Open Funds of the Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, No.MGE-2016KG06; Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Programs, No. CHINARE2016-03-03; Taishan Scholars Project Special Fund Project, No. TSPD20161007]

作者简介: 孙志文(1991-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积声学, 电话: 0532-82896931, E-mail: zhiwensun91@163.com; 阚光明, 通信作者, 电话: 0532-88965565, E-mail: kgming135@fio.org.cn; 郭常升, 通信作者, 电话: 0532-82898529, E-mail: guochine@qdio.ac.cn

学发展迅速,卢博等^[8]分别给出了压缩波速与孔隙度、含水量的相关关系和回归方程。邹大鹏等^[9]比较了国内外主要研究者提出的海底沉积物声速单参数、双参数和多参数回归方程的物理意义和适用性,提出了新的声速与孔隙度、含水量双参数回归方程。国内研究区域多集中在黄海、东海、南海等近海大陆架区域,对深海海底沉积物声学特性与物理特性的相关关系研究相对较少,且所用频率单一。

沉积物声学性质在不同海域变化较大,与海底沉积环境、沉积物来源、沉积条件和沉积作用过程有关,本文主要介绍了菲律宾海深海海底沉积物实验室声学特性的测量方法及声速校正方法,讨论分析了实测声速、声速比、声阻抗和声阻抗指数与孔隙度、密度等物理性质的相关关系及其与前人回归方程的对比,该研究有助于声速回归方程的建立,为今后的海底沉积物声速预测奠定基础。

1 数据来源

1.1 样品来源和测量方法

海底沉积物样品取自菲律宾海,采用柱状取样器进行取样,共获得 18 个站位的深海海底沉积物样品,取得的沉积物样品长度范围为 0.27~2.79 m。

沉积物声速的测量仪器包括信号发生器、WSD-3 数字声波仪、测量平台。用信号发生器激发发射换能器,发射单频 3~5 个周期的正弦信号,用 WSD-3 数

字声波仪对接收换能器获取的接收信号进行记录,测量频率分别为 47、94、247 kHz 等 3 种,发射电压为 10 V,采样间隔为 0.1 μ s。测量平台自带测量卡尺,精确到 0.1 mm。如图 1 所示(T 为发射换能器;R 为接收换能器;L 为样品长度),将沉积物柱状样品固定在测量平台上,发射和接收换能器固定在样品两端,用以测量整段的沉积物柱状样品 S 的长度和声学参数。然后将 S 截成 2 段,分别测量 S1、S2 两段沉积物的长度和声学参数。测量之前在换能器表面涂抹有耦合剂,保证换能器与样品间耦合良好;测量过程中,正弦声波由信号发生器激发并由发射换能器发出,信号穿过沉积物柱状样品后由接收换能器接收,记录于 WSD-3 数字声波仪中,如图 2;测量完成后,用 PVC 盖、保鲜膜和胶带密封好,防止水分挥发,以保证其后物理参数测量的准确性。

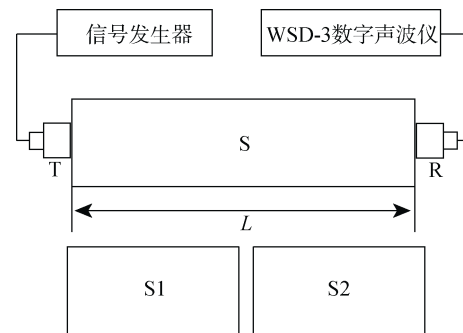


图 1 沉积物声学测试示意图

Fig. 1 Sketch diagram acoustic measurement of sediment

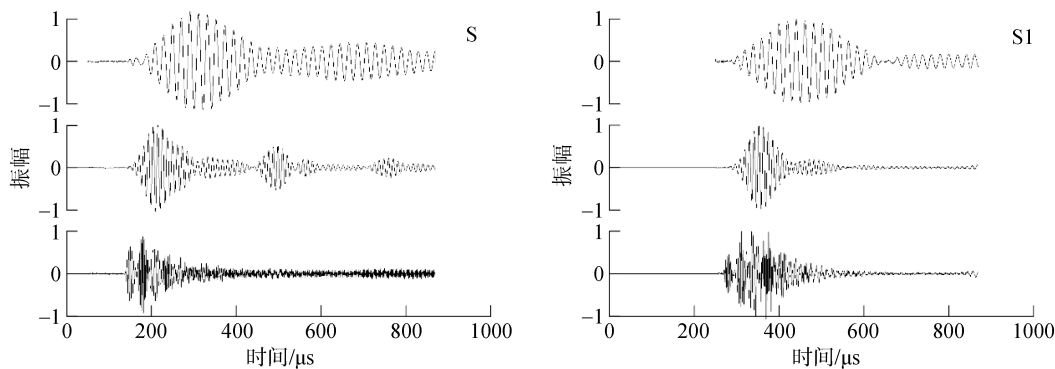


图 2 某站位 S、S1 段 47、94、247 kHz 信号波形图

Fig. 2 A station S, part S1, 47, 94, 247 kHz signal waveform diagram

全部沉积物柱状样品声学测量结束后,对样品进行物理性质测试,获取了样品的颗粒组分、平均粒径、密度、含水量等参数。沉积物密度利用环刀法进行测量,沉积物孔隙度利用颗粒密度、含水量等数据计算获得。

1.2 数据处理

完成沉积物柱状样品测量后,统一增益、延时和采样间隔,人机交互读取起跳点获得信号初至时间,结合测量平台测量的沉积物柱状样品长度,由式(1)计算沉积物声速:

$$C_p = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, C_p 为海底沉积物声速(m/s); Δd 为沉积物柱状样品的长度(m); Δt 为声波穿过沉积物柱状样品的时间(s)。

2 校正模型

实验室测量时, 温度和压力会对沉积物声速产生极大的影响。在不同温度和压力下, 同一种海底沉积物声速也不相同, 各个研究者的经验方程中未剔除掉该影响因素。在众多经验方程中, 同一研究者不同深度的测量数据未经过温度和压力校正直接建立的声速和物理参数回归方程是不准确、不严谨的; 同一研究者采用不同方法测得的数据未经过温度和压力校正, 直接分析测量方法的差异性, 也是存在误差的; 不同研究者的研究数据互相比拟时, 环境参数的影响可能掩盖了沉积物本身声学特征的差异。因此, Hamilton 等^[5]在 1982 年提出的声速比校正模型可以对不同海底深度、不同实验室测量条件下存在温度、压力差异的沉积物声速数据进行校正。邹大鹏等^[10]对南海沉积物声学性质的研究表明, 海底沉积物与海水声速比能够较好地表述沉积物的声学特征。参照 Hamilton 等^[5]声速校对方程, 假定声速比随海水深度不变, 其声速比校正模型如下:

实验室水中声速采用 Mackenzie 公式计算获得,

$$\begin{aligned} C_w = & 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2} T^2 + \\ & 2.374 \times 10^{-4} T^3 + 1.340(S - 35) - \\ & 1.025 \times 10^{-2} T(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2} D + \\ & 1.657 \times 10^{-7} D^2 - 7.139 \times 10^{-13} TD^3 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, T 为温度(°C); D 为深度(m); S 为盐度, 深度与压力相对应。为简化, 海底沉积物的盐度统一采用 34.5, 其他条件为 Hamilton 标准实验室条件: 23°C, 1 个标准大气压。

实验室环境下, 沉积物声速与水中声速的比值为声速比, 声速比 R 为:

$$R = \frac{C_p}{C_w} \quad (3)$$

式中, C_p 为实验室环境下沉积物的实测声速; C_w 为计算得到的水中声速; R 为声速比。式(2)、(3)组成的海底沉积物声速比校正方法可以将实验室环境下测量得到的声速校正为声速比, 通过该校正方法研究者可消除掉温度和压力对沉积物声速的影响。其实实验结果展现的是沉积物颗粒组成、结构等本身特征对声学特性的影响。

3 声学特性与物理性质相关关系的讨论分析

3.1 沉积物声速和孔隙度

饱和海底沉积物是由沉积物颗粒骨架与孔隙海水组成的双相介质。在声波传播过程中, 沉积物颗粒骨架和孔隙海水提供了声波在沉积物中的传播路径。而孔隙度是指孔隙海水所占的体积与沉积物总体积之比, 是描述海底沉积物声速的基本物理参数^[11]。邹大鹏等^[12]指出在海底沉积物诸多物理性质中, 孔隙度是一项重要参数, 不同时代的许多学者研究表明, 沉积物孔隙度与声速相关性较强, 因此研究海底沉积物时, 认识孔隙度是非常必要的。卢博等^[8]认为孔隙度体现了沉积物骨架的密实程度, 对沉积物而言, 骨架越密, 声速就越高, 因此采用孔隙度作为声速回归方程的参数具有重要意义。对于海底沉积物声速与孔隙度的相关关系, 国内外学者进行了大量研究。Hamilton 等^[5]、Anderson^[7]、卢博等^[8]、Liu 等^[13]在不同海域对采集的样品进行实验分析, 总结了沉积物声速与孔隙度回归方程。现将国内外沉积物声速(C_p)与孔隙度(n)回归方程列出:

Hamilton 等^[5]公式

$$C_p = 2502.0 - 23.45n + 0.14n^2, (0.35 \leq n \leq 0.85) \quad (4)$$

Orsi 和 Dunn^[6]公式

$$C_p = 2527.4 - 27.132n + 0.1782n^2 \quad (5)$$

Anderson^[7]公式

$$C_p = 2506 - 27.58n + 0.1868n^2 \quad (6)$$

卢博等^[8]公式

$$C_p = 2369.07 - 25.53n + 0.185n^2 \quad (7)$$

Liu 等^[13]公式

$$C_p = 2133.7 - 1857.9n + 1250.2n^2 \quad (8)$$

除 Orsi 和 Dunn 公式外, 上述研究区域主要集中于浅海大陆架或大陆坡, 对深海海底沉积物样品研究较少。本次实验样品采样水深最深为 3 164~5 592 m, 平均深度 4 957 m, 因此本文主要针对深海海底沉积物声学特性进行分析研究。本次实验建立的深海海底沉积物声速、声速比与孔隙度的相关关系(图 3、图 4)和回归方程(表 1)。如图 3a、图 4a 所示, 该海域海底沉积物的临界孔隙度为 0.78。当孔隙度 < 0.78 时, 沉积物声速随孔隙度的增加而减小; 当孔隙度 > 0.78 时, 沉积物声速随孔隙度的增加而增加, 海底

沉积物声速与孔隙度呈二次方关系。Hamilton 等^[5]指出在天然沉积物中, 孔隙度通常为 0.35~0.90, 远洋深海沉积物的孔隙度比大陆阶地的高, 海底沉积物柱

状样品的声速为 1 493~1 836 m/s。本文所测孔隙度范围为 0.67~0.85, 沉积物声速范围为 1 480~1 600 m/s, 与 Hamilton 等^[5]、卢博等^[18]的测量区间一致, 结果可信。

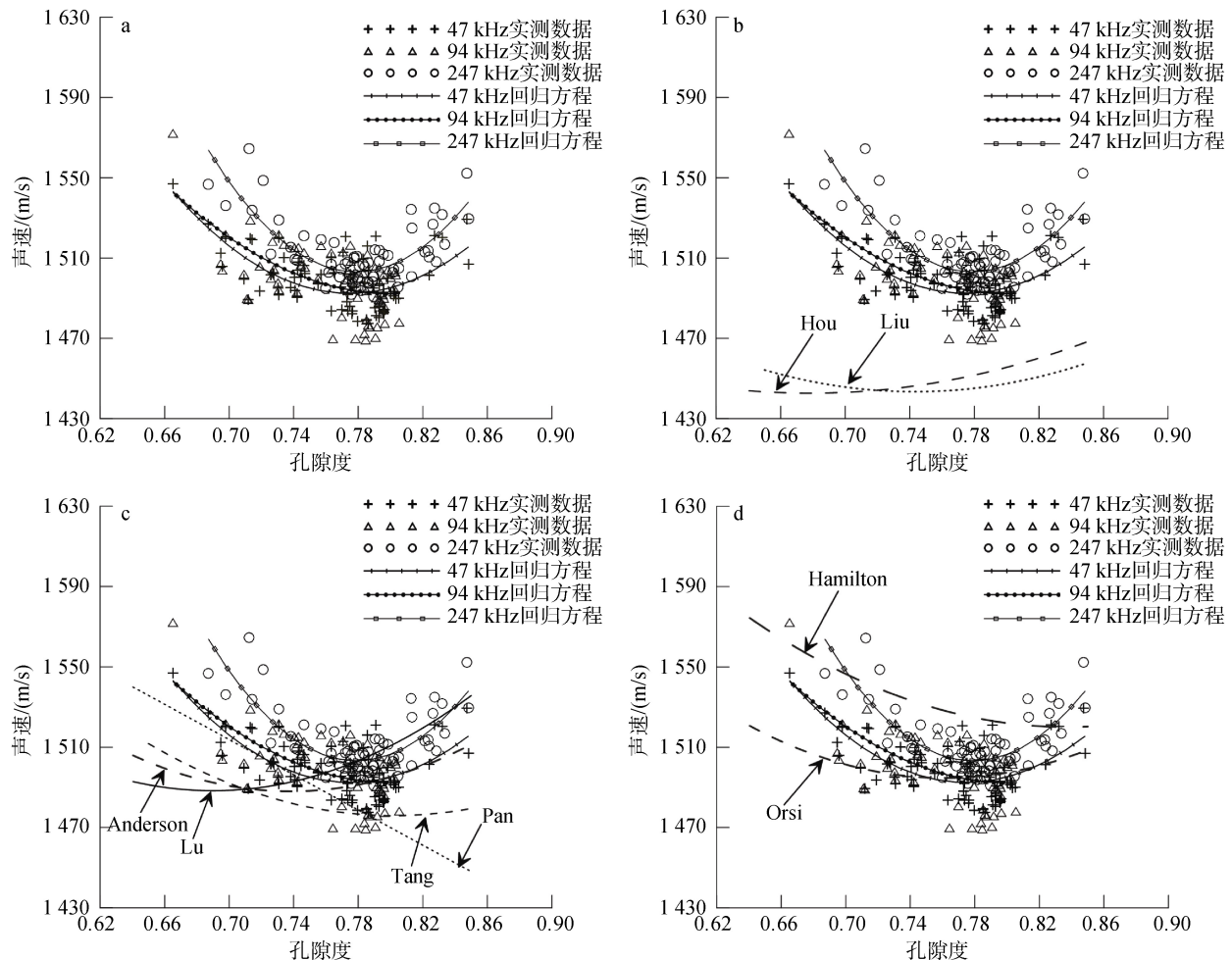


图 3 校正前, 实测声速与孔隙度相关关系^[5-8, 13, 15-16, 26]

Fig. 3 Pre-correction correlation between measured sound speed and porosity

a. 实测数据及拟合公式; b. 文献[13, 16]经验公式; c. 文献[7, 13, 15, 26]经验公式; d. 文献[5-6]经验公式; 图 4 同
a. measured data and fitted formulas; b. Literature [13, 16] empirical formula; c. Literature [7, 13, 15, 26] empirical formula; d. Literature [5-6] empirical formula; Same as Fig. 4

图 3a 为校正前的实验室实测声速值。图 3b-3d 为校正前实测声速值与各回归方程对比。由图 3b 可知, Liu 等^[13]、侯正瑜等^[16]声速回归方程预测值整体较低, 基本在 1 490 m/s 以内, 相关系数均小于 0.5。(图 3b)。唐永禄^[15]、卢博等^[8]、潘国富^[26]、Anderson^[7]与本次测量数据误差虽相对较小, 但相关系数仍小于 0.5。Orsi 和 Dunn^[6]为深海数据与本文实测数据拟合较好, 相关系数为 0.53, Hamilton^[5]回归方程可作为本次测量数据的上边界。

由于 Hamilton^[5]回归方程采用了 23℃、1 个标准大气压的标准状态, 故只分析 Hamilton^[5]回归方程校正前后差别, 其他回归方程声速测量的实验状态不同, 故其声速比校正仅为参考。校正前, 如图 3d

所示, 实验室环境下测量得到的声速值与 Hamilton^[5]回归方程符合度较差, 大多数声速值位于 Hamilton^[5]回归方程以下, Hamilton^[5]回归方程预测值明显偏高。通过声速比校正后, 如图 4d 所示, 声速比与 Hamilton^[5]回归方程的符合度比声速与 Hamilton^[5]回归方程的符合度好。特别是 247 kHz 的高频数据, 声速比与 Hamilton^[5]回归方程的符合度较好, 低频数据符合度略差(Hamilton^[5]测量的频率为 200 kHz, Orsi 和 Dunn^[6]测量的频率为 400 kHz, 本次实验测量的频率为 247 kHz, 都是高频声速数据与 Hamilton 回归方程, 符合度较好; Liu 等^[13]的测量频率为 30 kHz, 频率相对较低, 符合度不是很好)。

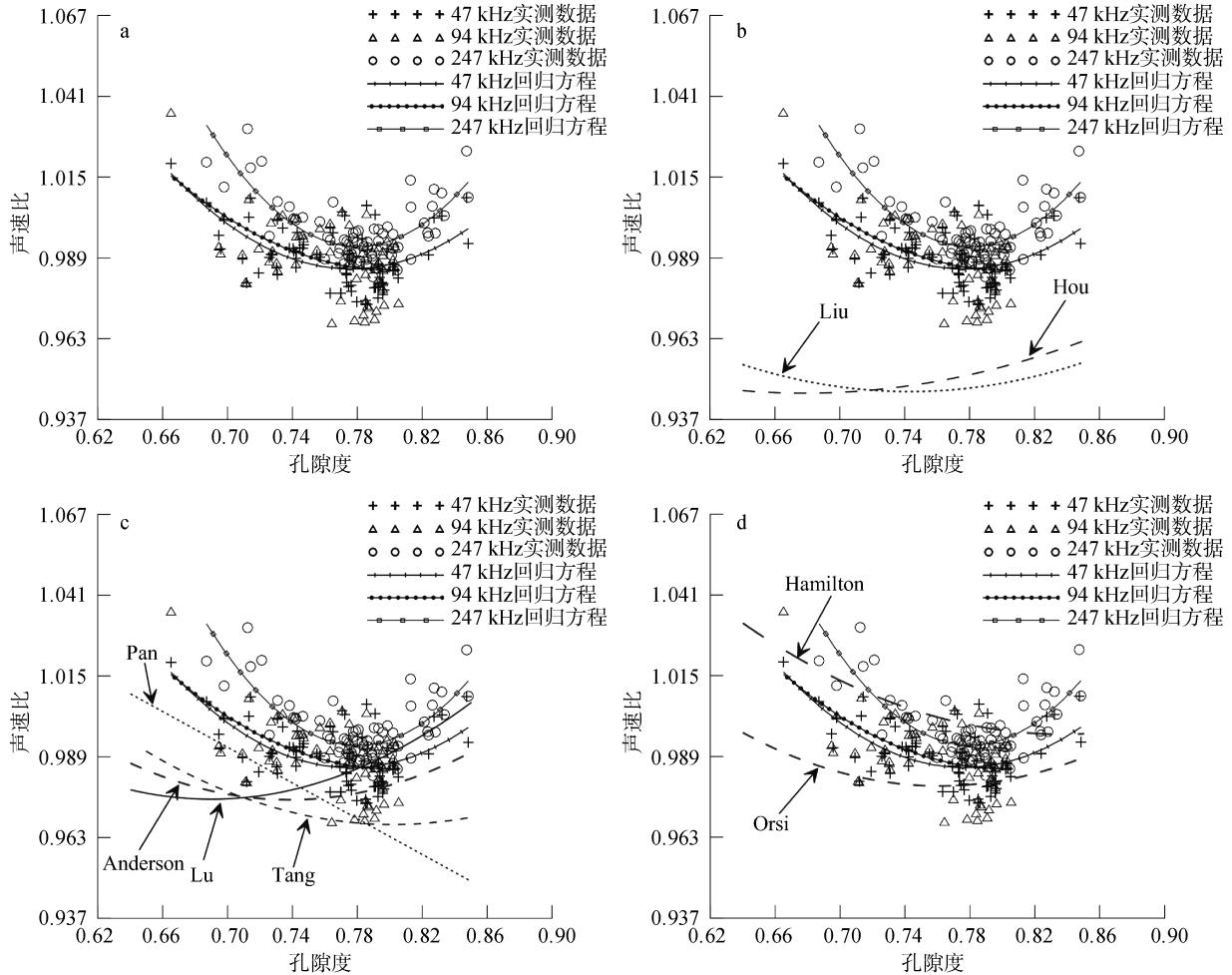


图 4 校正后, 声速比与孔隙度相关关系^[5-8, 13, 15-16, 26]

Fig. 4 Post-correction correlation between sound speed ratio and porosity

表 1 声速、声速比与孔隙度回归方程

Tab. 1 Sound speed, sound speed ratio and porosity prediction equations

参数	频率/kHz	回归方程	R
声速-孔隙度	47	$C_{47} = 4\,040.7 - 6\,580.2n + 4\,247.8n^2$	0.64
	94	$C_{94} = 3\,239.1 - 4\,358.7n + 2\,718.7n^2$	0.58
	247	$C_{247} = 5\,874.9 - 11\,226.4n + 7\,207.1n^2$	0.79
声速比-孔隙度	47	$R_{47} = 2.489 - 3.873n + 2.495n^2$	0.57
	94	$R_{94} = 2.036 - 2.623n + 1.637n^2$	0.52
	247	$R_{247} = 3.731 - 7.017n + 4.496n^2$	0.78

3.2 沉积物声速与密度

密度是指沉积物的单位质量, 与沉积物物质组成、土粒比重、孔隙体积及孔隙中水的含量有关, 其值可以综合反映土的物质组成与结构特征^[17]。海底沉积物参考声速由底质性质确定, 密度作为沉积物的基本物理性质之一, 同时也是主要的声学性质参数之一, 对海底沉积物声速有重要影响^[18]。沉积物声速与密度存在着明显的相关关系, 利用这种相关关

系可为海底沉积物的正演和反演提供参考依据^[19]。

声波通过饱和多孔介质(如沉积物)时, 其传播速度受介质的固体和孔隙流体影响。Biot^[19-21]给出了流体在饱和多孔介质中声传播的一般理论, 公式如下:

$$C_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (9)$$

$$K = P + 2Q + R \quad (10)$$

P 、 Q 、 R 均为 Biot 系数, 其中

$$P = \frac{(n-1)^2 C_{pc} + (n-1) C_{s,pc} + C_w}{C_t (C_w - C_{s,pc}) + C_{pc} C_{s,pc}} + \frac{3}{4} \mu \quad (11)$$

$$Q = -n \frac{(n-1) C_{pc} + C_{s,pc}}{C_t (C_w - C_{s,pc}) + C_{pc} C_{s,pc}} \quad (12)$$

$$R = \frac{n C_t}{C_t (C_w - C_{s,pc}) + C_{pc} C_{s,pc}} \quad (13)$$

$$C_t = n C_{pc} + C_{s,pc} \quad (14)$$

式中, C_t 为沉积物骨架体积压缩系数; $C_{s,pc}$ 为固体颗粒压缩系数; C_{pc} 为孔隙压缩系数; C_w 为流体压缩系数; n 为孔隙度; K 为体积模量; ρ 为密度。

本次实验根据测量得到的声速、声速比和密度数据,建立了声速、声速比和密度的相关关系(图 5、图 6)和回归方程(表 2)。由图 5、图 6 可知,本海域海底沉积物的临界密度为 $1.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。当密度 $< 1.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 时,声速随密度增大而减小;当密度 $> 1.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 时,声速随密度的增大呈增加的趋势。本文所测密度范围为 $1.26 \times 10^3 \sim 1.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,密度变化范围与南沙群岛海域($1.28 \times 10^3 \sim 1.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)^[23]、黄海($1.2 \times 10^3 \sim 1.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)^[24]基本一致,比渤海湾($1.5 \times 10^3 \sim 2.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)^[25]、东海($1.6 \times 10^3 \sim 2.09 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、南海北部大陆架($1.5 \times 10^3 \sim 2.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)^[17]的密度范围略低。

沉积物由于海底环境与沉积历史不同,其密度与弹性模量存在差异,因此导致各海区声速分布不同^[11]。由公式(9)~(14)可知,声速与密度的倒数呈二次方关系,在体积模量不变的情况下,密度增大,沉积物声速会减小。但是密度越大,体积模量也会越大,不仅抵消了密度的影响,且往往会高出密度许多,因此最终出现密度越大,声速越大的现象。

表 2 声速、声速比与密度回归方程

Tab. 2 Sound speed, sound speed ratio and density prediction equations

参数	频率/kHz	回归方程	R
声速-密度	47	$C_{47} = 2\,392.2 - 1\,376.8\rho + 523.62\rho^2$	0.73
	94	$C_{94} = 2\,470.7 - 1\,470.5\rho + 553.43\rho^2$	0.69
	247	$C_{247} = 3\,457.4 - 2\,854.5\rho + 1\,042.6\rho^2$	0.79
声速比-密度	47	$R_{47} = 1.500 - 0.7967\rho + 0.3060\rho^2$	0.69
	94	$R_{94} = 1.644 - 0.9804\rho + 0.3653\rho^2$	0.62
	247	$R_{247} = 2.137 - 1.682\rho + 0.6176\rho^2$	0.77

校正前,如图 5 所示,声速与密度相关关系中,Hamilton 回归方程预测值偏高,实测值大部分位于 Hamilton 回归方程下方,二者符合度较差。声速比校正后,如图 6 所示,声速比数据与 Hamilton 回归方程较为匹配,247 kHz 的高频数据符合度最好,低频数

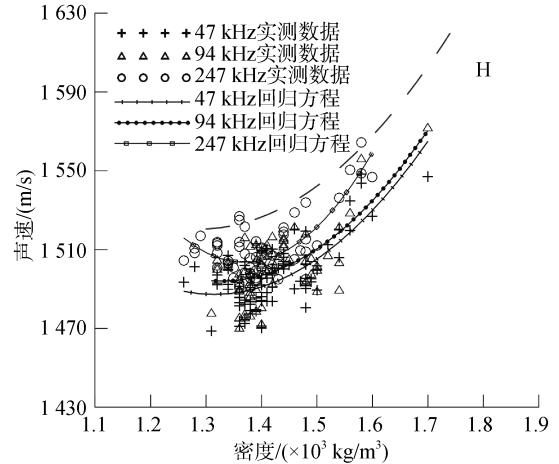


图 5 校正前,实测声速与密度相关关系

Fig. 5 Pre-correction correlation between sound speed and density

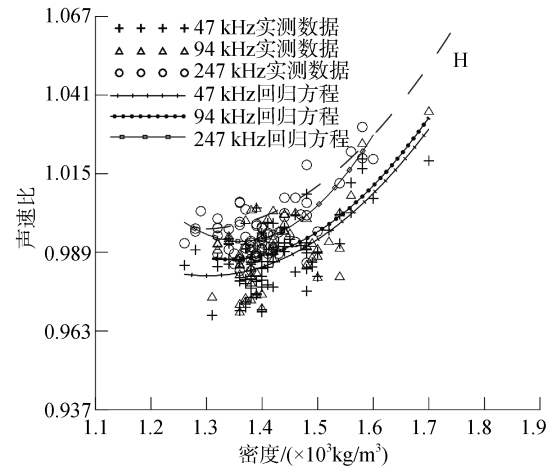


图 6 校正后声速比与密度相关关系

Fig. 6 Post-correction correlation between sound speed ratio and density

据符合度略差。

3.3 回归方程的匹配性分析

阚光明等^[14]和唐永禄^[15]指出,Hamilton 测量得到的声速值比我国周边大陆架的声速值约高 50 m/s。

侯正瑜等^[16]研究表明,南沙海域数据与 Hamilton 回归方程符合度较差。潘国富^[26]指出 Hamilton 回归方程在大陆架和大陆坡等深度较浅的海域,利用孔隙度预测声速时,预测值比实际测量值偏高。本文研究表明,深海高频数据与 Hamilton 回归方程的符合度较好,但无论是校正前的实验室声速,还是校正后的声速比都与 Anderson^[7]、Liu 等^[13]回归方程的符合度较差。这可能是由于 Anderson^[7]、Liu 等^[13]的回归方程数据多来自浅海大陆架或大陆坡,而本文数据取样深度为 3 164~5 592 m,属于深海数据。海底沉积物大致可分成两类:一类是分布在,在大陆架和大陆坡上,以陆源物质为主,颗粒较粗;另一类是分布在,在深海盆地上,以生物沉积物质为主,颗粒较细。深海数据与浅海回归方程符合度较差的原因可能是,浅海区域以陆源碎屑颗粒为主,残余沉积的粗颗粒沉积物较多,细颗粒沉积物较少,沉积物颗粒大小不一,孔隙度小,密度大。而深海盆地沉积物以内源沉积为主,沉积物质多以生物沉积为主,沉积物颗粒细,大小相对均一,孔隙度大,密度小。因浅海与深海的海底沉积环境、沉积物来源、沉积条件和沉积作用过程等有较大差别^[27],且海底底质的不同导致基于不同海底底质建立的回归方程间的通用性较差,因此在使用声速回归方程时应注意区分海底底质,注意区分浅海和深海。

3.4 声阻抗

声阻抗是水声传播中重要的海底界面参数之一,在建立地声模型中有重要贡献,当声波从一种介质传入另一种阻抗不同的介质时,阻抗的不同决定了能量反射的多少,根据沉积物声阻抗与海水声阻抗可计算 Rayleigh 反射系数和垂直入射时的海底损失,因此声阻抗是确定海底反射和透射性能的主要因素^[5]。声阻抗是声速与密度的乘积,但声阻抗和声速是两个物理含义完全不同的沉积物声学特性参数,声速反映的是声波在沉积物中传播的快慢,而声阻抗则反映的是沉积物阻止声波在其中传播的特性^[28]。因此,声阻抗与沉积物物理力学性质的相关关系和声速与沉积物物理力学性质的相关关系是存在差异的。

本文利用获得的海底沉积物声学特性和物理力学性质数据,对该海域海底沉积物声阻抗与物理力学参数的相关关系进行对比分析,测量过程中采用

多种频率对沉积物样品的声学特性进行测量,分别对声阻抗和孔隙度、密度,声阻抗指数和孔隙度、密度进行回归分析,将物理参数作为自变量,将沉积物声学参数作为因变量,采用最小二乘法拟合得到声阻抗与物理参数的相关关系(图 7、图 8)和回归方程(表 3)。

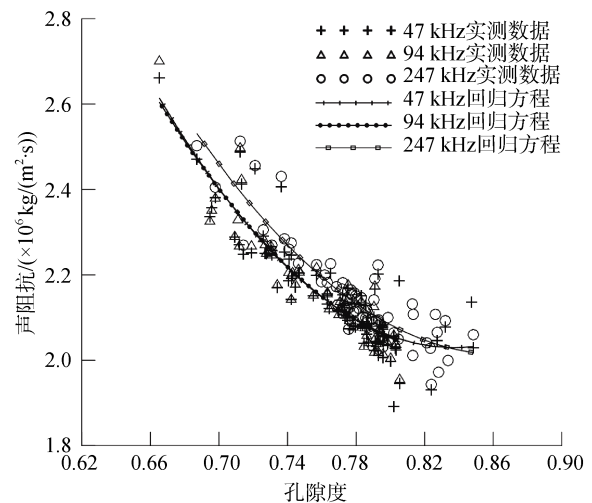


图 7 声阻抗与孔隙度的相关关系

Fig. 7 Correlation between acoustic impedance and porosity

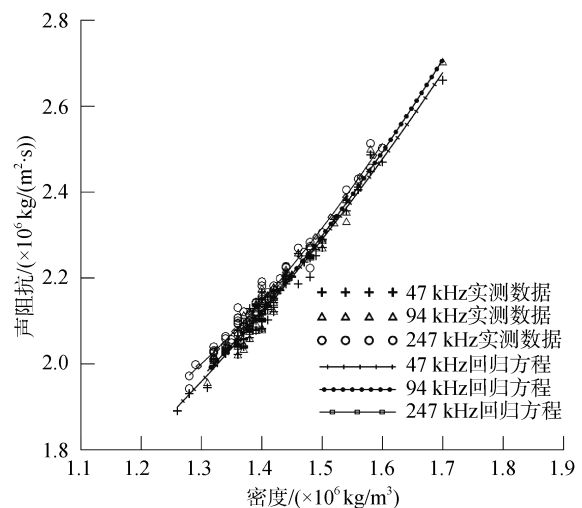


图 8 声阻抗与密度的相关关系

Fig. 8 Correlation between acoustic impedance and density

图 7 为沉积物声阻抗与孔隙度相关关系,结果表明声阻抗与孔隙度的相关关系较好,相关系数 R 大于 0.91,声阻抗平均值为 $2.15 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。其中孔隙度与声阻抗呈负相关关系,即随着孔隙度的增大,声阻抗逐渐减小。

表 3 沉积物声阻抗与孔隙度、密度回归方程

Tab. 3 Acoustic impedance and porosity density prediction equations

参数	频率/kHz	回归方程	R
声阻抗-孔隙度	47	$Z_{47}=15.86-33.02n+19.71n^2$	0.90
	94	$Z_{94}=14.72-29.95n+17.64n^2$	0.94
	247	$Z_{247}=14.16-28.06n+16.20n^2$	0.91
声阻抗-密度	47	$Z_{47}=1.219-0.3710\rho+0.7232\rho^2$	0.99
	94	$Z_{94}=1.782-1.160\rho+1.003\rho^2$	0.98
	247	$Z_{247}=1.895-1.253\rho+1.022\rho^2$	0.98

图 8 为沉积物声阻抗与密度的相关关系, 声阻抗与密度具有非常好的相关性, 相关系数 R 大于 0.98, 单从相关系数来看, 声阻抗与密度的相关度最好, 声阻抗平均值在 $2.15 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右。与孔隙度相反, 声阻抗与密度呈现正相关关系, 密度越大, 声阻抗越大。沉积物声阻抗为声速与密度乘积, 而沉积物声阻抗在很大程度上与沉积物的可压缩性有关, 密度越大, 孔隙度越小, 则沉积物越密实, 其可压缩性越小, 声速和声阻抗则越大。

3.5 声阻抗指数

声阻抗指数(IOI)通过引入一个与孔隙水无关的量来表征沉积物的声阻抗。声阻抗指数是声速比与密度的乘积, 与孔隙水温度、盐度和压力无关, 所以声阻抗指数体现了传播介质的固有属性, 不受外界因素影响。

本文建立了声阻抗指数与孔隙度、密度的相关关系(图 9、图 10)和回归方程(表 4), 从图中可以看出, 沉积物声阻抗指数随孔隙度的增大而减小, 两者关

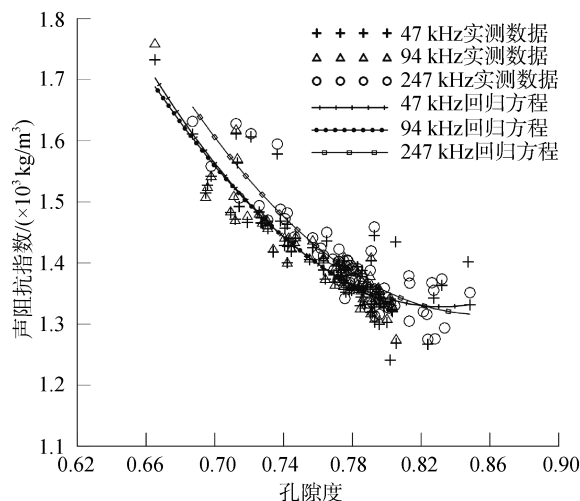


图 9 声阻抗指数与孔隙度的相关关系

Fig. 9 Correlation between IOI and porosity

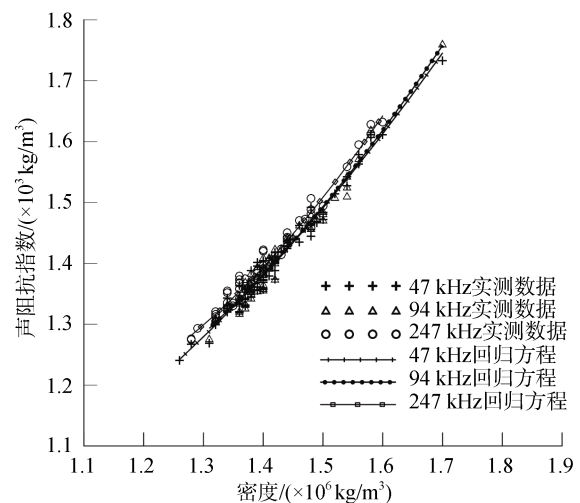


图 10 声阻抗指数与密度的相关关系

Fig. 10 Correlation between IOI and density

系曲线近似抛物线, 声阻抗指数与孔隙度相关系数大于 0.89, 符合度较好。从图 10 中可以看出声阻抗指数随密度的增大近似线性增大, 声阻抗指数与密度的相关系数大于 0.98, 符合度非常好。声阻抗指数之所以与孔隙度、密度符合度较好, 是因为声阻抗指数本身就是声速比和密度的乘积, 沉积物密度是利用环刀法测量的, 而沉积物孔隙度是利用颗粒密度、含水量等数据计算获得。

3.6 声学参数与频散效应

声波在沉积物中传播时具有一定的频散现象, 即测量频率不同, 声速存在细微差别, 一般随着频率的增大而增大, 见图 3—图 6。图 7—图 10 中所示, 不同频率的声阻抗不同, 说明声阻抗也存在一定的频散性。与声速的频散规律相类似, 声阻抗一般随频率的增大而增大。本文声速数据的测量频率分别为 47、94、247 kHz, 许多回声探测设备的工作频率为 3.5~30 kHz^[28], 此范围的声速与声阻抗则更小。

表 4 声阻抗指数与孔隙度、密度回归方程

Tab. 4 IOI and porosity, density prediction equations

参数	频率/kHz	回归方程	R
声阻抗指数-孔隙度	47	$IOI_{47}=10.65-22.42n+13.47n^2$	0.89
	94	$IOI_{94}=9.407-19.07n+11.23n^2$	0.94
	247	$IOI_{247}=11.96-20.47n+10.07n^2$	0.90
声阻抗指数-密度	47	$IOI_{47}=0.9567-0.4536\rho+0.5398\rho^2$	0.98
	94	$IOI_{94}=1.278-0.8969\rho+0.6936\rho^2$	0.98
	247	$IOI_{247}=1.587-1.335\rho+0.8556\rho^2$	0.99

4 结论

本文基于实验室实测声学数据和物理参数,建立了研究区声学特性与物理参数多个回归方程并与前人的回归方程进行对比,主要得到以下结论:

1) 声速比校正可修正实验室测量时温度和压力引起的声速测量误差。校正后的声速比更符合 Hamilton^[5]声速回归方程。

2) 深海声学数据与 Orsi and Dunn、Hamilton 回归方程符合度较好。其中深海高频声学数据对 Hamilton 回归方程符合度最好。

3) 与声速相比,声阻抗、声阻抗指数回归方程与孔隙度、密度的符合度更好。

4) 回归方程的泛化推广需要进一步研究,浅海和深海、高频和低频数据在建立回归方程时应区分使用。

本文的研究成果能够为深海海底沉积物物理力学性质预测或基于声学方法对海底沉积物性质进行遥测提供数据支持。但实验数据多集中于特定深海区域,要得到对声速特征与物理性质更全面准确的认识,还需要其他深海海域的数据支持。不同海底底质类型声速回归方程的通用性仍需进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 周建平, 吕文正, 陶春辉. 海底柱状沉积物超声测量[J]. 海洋学研究, 2003, 21(4): 27-34.
Zhou Jianping, Lü Wenzheng, Tao Chunhui. Ultrasonic measurement of seafloor sediment cores[J]. Journal of Marine Sciences, 2003, 21(4): 27-34.
- [2] 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 geoaoustic measuring system[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(2): 46-50.
- [3] 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]. 中国海洋大学学报自然科学版, 2013, 43(3): 75-80

Wang Jingqiang, Guo Changsheng, Li Huiyin. The experimental study of in situ acoustic measurement system in Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(3): 75-80.

- [4] Hamilton E L. Geoaoustic modeling of the sea floor[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(68): 1313-1340.
- [5] Hamilton E L, Bachman R T. Sound velocity and related properties of marine sediments[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(6): 1891-1904.
- [6] Orsi T H, Dunn D A. Sound velocity and related physical properties of fine - grained abyssal sediments from the Brazil Basin (South Atlantic Ocean)[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 88(3): 1536-1542.
- [7] Anderson R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[C]//Hampton L. Physical of Sound in Marine Sediment. US: Springer, 1974: 481-518.
- [8] 卢博, 李赶先, 孙东怀, 等. 中国东南近海海底沉积物声学物理性质及其相关关系[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(2): 12-17.
Lu Bo, Li Ganxian, Sun Donghuai, et al. Acoustic-physical properties of seafloor sediments from near-shore southeast China and their correlations[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(2): 12-17.
- [9] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物声速经验方程的分析和研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 43-50.
Zou Dapeng, Wu Baihai, Lu Bo. Analysis and study on the sound velocity empirical equations of seafloor sediments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(4): 43-50.
- [10] 邹大鹏, 阎贫, 卢博. 基于海底表层沉积物声速特征的南海地声模型[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 80-86.
Zou Dapeng, Yan Pin, Lu Bo. A geoaoustic model based on sound speed characteristic of seafloor surface sediments of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(3): 80-86.

- [11] 龙建军, 李赶先. 海底沉积物声速与物理性质的理论关系[J]. 声学学报, 2015(3): 462-468.
Long Jianjun, Li Ganxian. Theoretical relations between sound velocity and physical-mechanical properties for seafloor sediments[J]. Acta Acustica, 2015(3): 462-468.
- [12] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物孔隙度计算方法与声速反演的误差分析研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(4): 32-36.
Zou Dapeng, Wu Baihai, Lu Bo. A research on error analysis of seabed sediment porosity by calculation method and sonic speed retrieval method[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(4): 32-36.
- [13] Liu B, Han T, Kan G, et al. Correlations between the in situ acoustic properties and geotechnical parameters of sediments in the Yellow Sea, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 77(21): 83-90.
- [14] 阚光明, 苏元峰, 李官保, 等. 南黄海中部海底沉积物原位声速与物理性质相关关系[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 166-171.
Kan Guangming, Su Yuanfeng, Li Guanbao, et al. The correlations between in-situ sound speeds and physical parameters of seafloor sediments in the middle area of the southern Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3): 166-171.
- [15] 唐永禄. 海底沉积物孔隙度与声速的关系[J]. 海洋学报, 1998, 20(6): 39-43.
Tang Yonglu. The Relationship between porosity of seabed sediment and sound velocity[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(6): 39-43.
- [16] 侯正瑜, 郭常升, 王景强. 南沙海域深水区表层沉积物声速与孔隙度相关关系[J]. 海洋科学, 2013, 37(7): 77-82.
Hou Zhengyu, Guo Changsheng, Wang Jingqiang. Surface sediments acoustic velocity and porosity correlation in Nansha sea area abyssal region[J]. Marine Sciences, 2013, 37(7): 77-82.
- [17] 程净净, 傅命佐, 孟祥梅, 等. 南黄海中部沉积物物理性质与压缩波速相关性分析[J]. 中国海洋大学学报自然科学版, 2011, S1: 331-336.
Chen Jingjing, Fu Mingzuo, Meng Xiangmei, et al. Correlation analysis of physical properties and compressional wave velocity of seafloor sediments from the central part of the South Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, S1: 331-336.
- [18] 卢博, 梁元博. 南海某海区海底沉积物物理、声学和弹性性质[J]. 海洋科学, 1995, 19(3): 42-46.
Lu Bo, Liang Yuanbo. Seabed sediments physical-acoustic and elastic properties of some area in South China Sea[J]. Marine Sciences, 1995, 19(3): 42-46.
- [19] 邹大鹏, 吴百海, 卢博, 等. 海底沉积物声学物理力学性质聚类分析研究[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(5): 12-17.
Zou Dapeng, Wu Baihai, Lu Bo, et al. Studies on clustering analysis of acoustic and physical-mechanical properties of seabed sediments[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(5): 12-17.
- [20] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low-frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.
- [21] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid II. higher frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179-191.
- [22] 王景强, 郭常升, 刘保华, 等. 基于 Buckingham 模型和 Biot-Stoll 模型的南沙海域沉积物声速分布特征[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 359-367.
Wang Jingqiang, Guo Changsheng, Liu Baohua, et al. Sound speed distribution of seafloor sediments in Nansha Islands Sea based on Buckingham Model and Biot-Stoll Model[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2016, 37(3): 359-367.
- [23] 卢博. 南沙群岛海域浅层沉积物物理性质的初步研究[J]. 中国科学: D 辑, 1997, 27(1): 77-81.
Lu Bo. A preliminary study on the physical properties of shallow sediments in the Nansha Islands[J]. Scientia Sinica: D series, 1997, 27(1): 77-81.
- [24] 徐善民. 南黄海表层沉积物天然湿容重和含水量的分布及其与粒度之间的关系[J]. 海洋科学, 1991, 15(3): 38-41.
Xu Shanmin. The distribution of natural bulk density and water content of sediment from south Yellow Sea and the relation with grain size[J]. Marine Sciences, 1991, 15(3): 38-41.
- [25] 秦蕴珊, 徐善民, 李凡, 等. 渤海西部海底沉积物土工学性质的研究[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(4): 305-314.
Qin Yunshan, Xu Shanmin, Li Fan, et al. Study on geotechnical properties of sediment cores in western Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(4): 305-314.
- [26] 潘国富. 南海北部海底浅部沉积物声学特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
Pan Guofu. Research on the acoustic characteristics of seabed sediments in the northern South China Sea[D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [27] Wang J, Guo C, Hou Z, et al. Distributions and vertical variation patterns of sound speed of surface sediments in South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 89(3): 46-53.
- [28] 阚光明, 苏远峰, 刘保华, 等. 南黄海中部海底沉积物声阻抗特性[J]. 吉林大学学报(地), 2014, 44(1):

386-395.

Kan Guangming, Su Yuanfeng, Liu Baohua, et al. Properties of acoustic impedance of seafloor sediments in

the middle area of the Southern Yellow Sea[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 386-395.

The relationship between the acoustic characteristics and physical properties of deep-sea sediments in the Philippine Sea

SUN Zhi-wen^{1, 2, 3}, SUN lei³, LI Guan-bao^{3, 4}, KAN Guang-ming^{3, 4}, GUO Chang-sheng^{1, 2, 4}, WANG Jing-qiang^{3, 4}, MENG Xiang-mei^{3, 4}

(1. CSA Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 4. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Received: Jun. 16, 2017

Key words: acoustic properties; physical properties; seabed sediments; deep sea; prediction equation

Abstract: To study the correlation between the acoustic and physical properties of deep seabed sediments, samples of deep-sea sediments from the Philippine Sea were tested for a range of acoustic properties such as sound speed, sound-speed ratio, acoustic impedance and index of acoustic impedance (IOI). The depth of the Philippine Sea ranges 3164–5592 m. Regression equations were established between acoustic properties and physical parameters of deep seabed sediments. The study showed that the deep-sea data was in poor agreement with the shallow-sea regression equations used in our study area. The Hamilton correction method was helpful in correcting for laboratory errors in temperature and pressure. Compared with sound velocity, the sound speed ratio was in better agreement with the Hamilton equation. The significance of the relationship between sediment physical properties and acoustic impedance plus IOI was greater than that between the physical properties and sound speed as well as sound speed ratio. Because of the rich and varied seabed environments, the regression equations must be distinguished with respect to their sources from different sea areas before being used. This study significantly enriches the acoustic data of deep seabed sediments and should spur further study of the acoustic properties of different deep seabed sediments.

(本文编辑: 刘珊珊)