

南沙海域深水区表层沉积物声速与孔隙度相关关系

侯正瑜^{1,2,3}, 郭常升^{1,2}, 王景强^{1,2,3}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用同轴差距测量法对南沙海域海底沉积物取样进行甲板现场声学测量, 并计算了声速, 结合沉积物取样分析获得的孔隙度, 研究了海底表层 100 cm 沉积物的声速和孔隙度之间的相互关系, 分析获得了孔隙度与海底沉积物声速关系的经验公式, 结果表明此海域沉积物声速的临界孔隙度为 67.80%。将此公式与国内外其他学者建立的经验公式进行了对比, 分析发现各预测方程之间存在着差异, 说明不同海域的沉积物声学特性具有差异性, 经验公式具有区域性, 同时分析了其他影响声速的因素。此项工作对于建立和研究南海声场环境具有重要意义。

关键词: 南沙海域; 海底沉积物; 声速; 孔隙度

中图分类号: P733. 23 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)07-0077-06

南沙海域是中国南疆的最南端, 位于南海南部, 12°N 以南, 海区面积广阔。南沙海域的自然资源丰富, 其南部、东部和西部的外缘地区蕴藏油气资源, 是地球物理和海洋科学研究的热点区域。海底沉积物声学特性对海洋声场有重要的影响, 与水声通讯和探测密切相关, 通过海底沉积物声学特性可以了解沉积物的物理性质, 为海底沉积物分类和海底工程条件评价等提供基础资料, 因此研究分析沉积物的声学物理参数相关关系具有重要的意义。目前获得海底沉积物声学参数的测量方法主要有两种: 原位测量和取样实验室测量^[1]。本文采用沉积物取样甲板测量, 在测量海区利用重力式取样器获取海底沉积物柱状样品, 然后在甲板上直接用仪器进行声学参数测量。甲板测量相对于陆地实验室测量省略了样品由测量海区搬运到实验室的过程, 避免了样品在搬运和保存过程中对沉积物造成的扰动, 减少了因扰动而造成的误差。

海底沉积物的声学性质与其物理性质密切相关, 国内外的学者对两者的相互关系进行了大量的研究, 代表性的有 Hamilton^[2]、Anderson^[3]、Orsi 和 Dunn^[4]、卢博^[5]、邹大鹏^[6]和周志愚^[7]等, 他们都总结了一些海底沉积物声速的预测方程。本文基于沉积物取样甲板测量获得的沉积物声速以及实验室测量得到的物理参数, 分析研究了声速与孔隙度的相关关系, 利用回归的方法建立了孔隙度声速预测方程, 并与国内外学者建立的预测方程进行了对比分析。

1 测量区域概况

南沙群岛海域浅层沉积物主要是由 5 类沉积物类型所组成: (1) 粉砂, (2) 粉砂质砂, (3) 砂质粉砂, (4) 黏土质粉砂, (5) 砂-粉砂质黏土, 基本上以粉砂粒级为主^[8]。研究区域位于南沙群岛海域, 分布在 4°~8°N, 110°~116°E, 本次测量采集站位 21 个, 水深介于 100~3 000 m, 其中两个站位水深小于 500 m, 其他站位水深均大于 1 000 m(图 1), 根据吴世敏对南沙海域构造单元的划分^[9], 采集的海底沉积物柱状样品主要来自于南沙地块隆起区和南沙地块前陆盆地区, 属于深水区。

2 同轴差距测量法与声速计算

沉积物声速的测量采用同轴差距测量法, 测量原理图如图 2 所示。测量设备为 WSD-3 数字声波仪, 测量参数为: 测量柱状样最大长度 100 cm、测量间隔 15 cm、测量频率 100 kHz、单道采样长度 1024、采样间隔 1 μs。

收稿日期: 2013-01-06; 修回日期: 2013-04-29

基金项目: 海洋公益性科研项目(200905025); 南海海底底质调查项目

作者简介: 侯正瑜(1988-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向为海洋地球物理与地质声学, E-mail: hansonhzy@foxmail.com; 郭常升, 通信作者, 男, 研究员, 电话: 0532-82898529, E-mail: guochine@ms.qdio.ac.cn

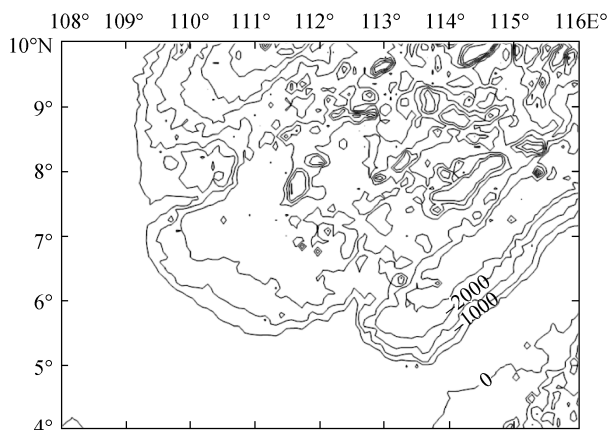


图 1 采样区域水深(m)图
Fig. 1 Sampling area depth (m)

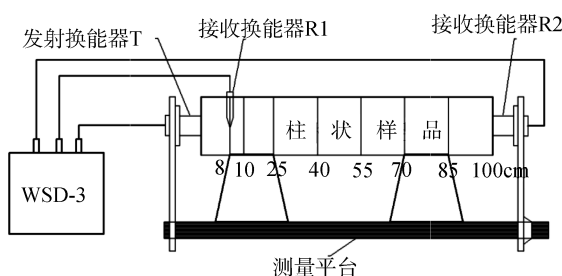


图 2 同轴差距测量方法示意图
Fig. 2 Coaxial differential distance attenuation measurement

2.1 测量步骤

利用重力取样器将海底沉积物柱状样品取上来以后,在甲板实验室将沉积物柱状样品固定在测量平台上,并将深度为 0~100 cm 的柱状样品用游标卡尺分为 100, 85, 70, 55, 40, 25, 10 cm 七段,按照图 2 所示,测量之前在换能器表面涂薄层凡士林,第一次测量时,将接收换能器 R1 固定在柱状样品 8 cm 处(R1 接收的声波作为信号对比道,用以计算沉积物声衰减系数,本文未涉及该系数),发射换能器 T 固定在底端,接收换能器 R2 固定在顶端 100 cm 处,接通电源,开始测量后,发射换能器 T 产生 100 kHz 的声波在沉积物柱状样品中传播,声信号首先到达接收换能器 R1,再经过时间 Δt 到达接收换能器 R2,测量过程由电脑控制并记录信号。第二次测量时,将柱状样品从顶端 100 cm 处切去 15 cm,样品剩余 85 cm,然后将接收换能器 R2 固定在顶端 85 cm 处,其他步骤与第一次测量相同,进行声波信号的第二次采集。一个沉积物柱状样品需要测量 7 次,每一次测量重复上述步骤,最后样品剩余 10 cm。

2.2 初至波读取

在计算声速之前,首先要确定声波信号初至点,确定信号到达接收换能器的时间 t 。为了准确地读取初至波,采用了小波变换模极大值法。

在声波的传播中,当穿过沉积物柱状样品的声波到达接收换能器时,在这一时刻,幅值发生突变,引起信号波形的变化,幅值的突变处可以看作信号的到时。小波分析具有良好的局部分析功能,可以方便地检测到信号的突变点,从而准确地得到声波信号的到达时间。利用小波分析检测信号突变点的一般方法是:对信号进行多尺度分析,在信号出现突变时,其小波变换后的系数具有模极大值。如果能检测出所有尺度上的小波变换模极大值,并形成一条平滑的模极大值线(不同尺度下对应的模极大值点的连线),就可以检测出信号的突变点^[10-12]。

2.3 声速计算

完成一个柱状样品的测量后,获得 100, 85, 70, 55, 40, 25, 10 cm 七段柱状样品的声波信号(图 3 所示),利用小波变换模极大值法读取每段信号的初至时间为 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$,在已知沉积物样品长度 L 的情况下,由式(1)可以计算出沉积物声速。

$$V_p = \frac{L}{t_i - t_{i+1}}, i=1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

其中 V_p 是沉积物声速。

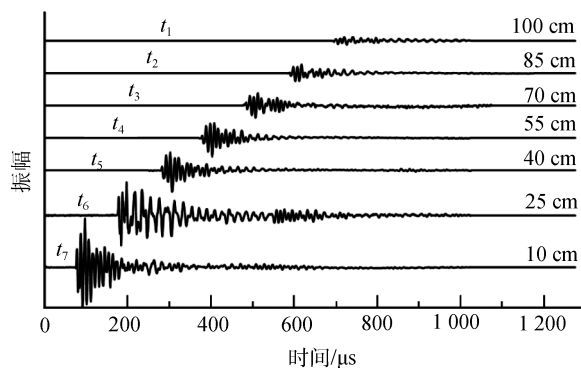


图 3 接收换能器 R2 接收到的同一个沉积物样品不同长度的声波

Fig. 3 Sound waves of different length of one sediment sample received by receiving transducer R2

3 声速特性分析

本次对南沙海域海底沉积物声速的调查采用甲板直接测量,实验条件为 1 个标准大气压,温度为常温,测量获得海底表层沉积物的声速变化范围为 1 421~

1 579 m/s, 将本海域的声速范围与其他一些海域声速结果做比较, 发现本海域的声速较低, 可能与沉积物的物理性质有关。

3.1 沉积物物理参数

在实验室对海底沉积物柱状样品进行湿密度、含水量、孔隙度等物理参数测量计算, 共测量湿密度 126 个、含水量 126 个、孔隙度 63 个。分析表明, 研究区域的沉积物湿密度变化范围为 1.1~1.83 g/cm³, 平均值 1.26 g/cm³, 比渤海湾(1.5~2.05 g/cm³)^[13]、黄海(1.2~1.95 g/cm³)^[14]、东海(1.6~2.09 g/cm³)和南海北部大陆架(1.5~2.02 g/cm³)^[15]以及南海西南部(1.58~1.96 g/cm³)^[13]的湿密度低, 属于低湿密度区域。含水量是沉积物实际含水多少的指标, 实验测量结果表明含水量的范围为 15.8%~68.74%。孔隙度表示沉积物中孔隙多少的程度, 孔隙度范围为 31.7%~85.9%。

3.2 沉积物声速和孔隙度的回归方程

孔隙度是沉积物中孔隙体积占总体积的百分比, 它表征了饱和沉积物内固体颗粒与液体的两相体积的大小关系, 沉积物可以看成是由沉积物孔隙所含流体与颗粒骨架组成的, 在声波传播中固相介质提供的是固体颗粒的声速和声波在固相中传播路径, 液相介质提供的则是孔隙流体的声速和声波在液相中传播的路径, 由于沉积物孔隙所含流体与矿物骨架之间在声学性质上具有明显的差别, 所以沉积物的孔隙度是影响沉积物声速的首要参数^[16]。对于沉积物声速和孔隙度之间的关系, Hamilton^[2]和 Anderson^[3]做了大量的分析研究工作, 总结出声速和孔隙度的回归方程, 国内一些学者结合实际资料也开展了海底沉积物声学性质与孔隙度的研究, 梁元博^[17]、周志愚^[18]、唐永禄^[19]、卢博^[5]等在不同海域采集样品进行了实验分析, 并总结了沉积物声速-孔隙度回归方程, 其中周志愚和唐永禄还在回归方程中引入了海水声速项。以上学者均认为孔隙度与海底沉积物声速的相关性最为密切。但是上述研究主要局限于第一类(大陆架)海区, 半深海和深海的海底沉积物样品采集和研究较少, 而此次研究的沉积物样品主要来自半深海海区(图 1)。现将本文和国内外在大陆架海底沉积物中声速与孔隙度关系回归方程列出:

本文:

$$C_p = 1841 - 11.75n + 0.08665n^2 \quad (2)$$

Anderson^[3]:

$$C_p = 2506 - 27.58n + 0.1868n^2 \text{ (大陆架)} \quad (3)$$

Hamilton^[2]:

$$C_p = 2455.9 - 21.716n + 0.126n^2 \text{ (大陆架、大陆坡)} \quad (4)$$

梁元博和卢博^[17]:

$$C_p = 2470.7 - 32.2n + 0.25n^2 \text{ (大陆架)} \quad (5)$$

周志愚等^[18]:

$$C_p = 962 + C_0 - 27.58n + 0.1868n^2 \text{ (南海北部大陆架)} \quad (6)$$

唐永禄^[19]:

$$C_p = C_0 + 942 - 25.02n + 0.156n^2 \text{ (南海北部大陆架)} \quad (7)$$

式中, C_p 为沉积物声速, C_0 为海水声速, n 为沉积物的孔隙度。其中本文建立的回归方程的均方根误差为 15.38, 相关系数 $R=0.8036$ 。

从图 4 可以看出, 测量数据与经验公式拟合较好, 为了对比分析, 将 Hamilton, Anderson 以及卢博的经验公式绘制于图 4。从图 4 可以看出, 声速是随孔隙度变化的二次方程, 随着孔隙度的增加, 海底沉积物声速减小, 当孔隙度增加到一定值 N (本文称之为临界孔隙度) 之后, 声速随着孔隙度的增加而变大。对比发现各个经验公式的 N 值均不相同, 各经验公式的 N 值及其对应的声速值见表 1。当沉积物孔隙度大于临界值时, 声速随着孔隙度增大而升高是由剪切模量的增大造成的。而剪切模量的增大是沉积物所含矿物在沉积时, 由水作用在矿物颗粒上的复杂的范德华力、库仑力和胶结作用相互作用引起的^[20]。再将三个经验公式与本次测量数据进行比较发现, Hamilton 测量的声速比此次测量结果平均高 100 m/s, Anderson 的测量值也比本次测量值大, 卢博的测量值与此次测量值相差较小(图 4)。由此可以看出, 不同海域测量的声速值不同, 其预测方程同样具有区域局限性。

分析认为, 测量结果受海底沉积物取样区域、海水深度、声速的测量方法、实验室环境及测量条件等影响。为了获得更精确的测量结果, 应尽可能避免人为因素的影响, 最好的方法是采用原位测量技术获取海底沉积物的声速。

3.3 基于时间平均的声速预测模型

Wyllie 等^[21-22]所建立的孔隙度与速度关系的时间平均方程是以固液双相的岩石模型为基础的, 将介质看作水平层状的液相与固相两部分, 声波穿过介质的总时间等于声波分别穿过液相和固相的时间之和, 以此来建立方程。假定其孔隙度为 n , 固体骨架

表 1 各经验公式 N 值与声速Tab. 1 The experience formula N value and sound velocity

公式	N 值(%)	声速(m/s)
卢博	64.40	1433.86
Hamilton	83.75	1520.03
Anderson	73.82	1487.99
本文	67.80	1442.67

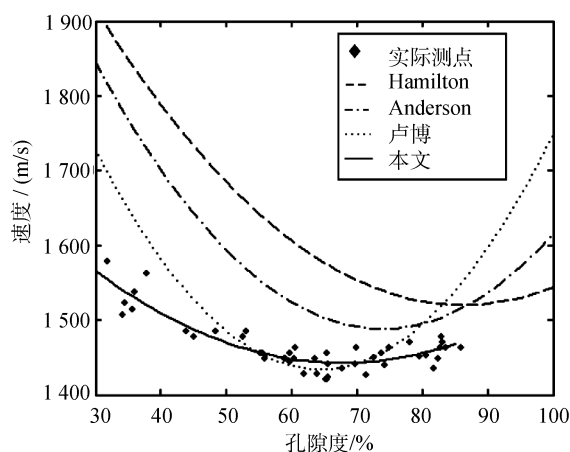


图 4 声速与孔隙度关系图

Fig. 4 Sound velocity and porosity relationship diagram

声速为 C_s , 孔隙流体声速为 C_l , 固液双相平均声速为 C_p , 则时间平均方程为:

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1-n}{C_s} + \frac{n}{C_l} \quad (8)$$

从运动学的角度看, 建立时间平均方程所基于的最基本的原理是路程、速度和时间的关系, 而在声传播过程中决定这 3 个物理量的则是固体颗粒、孔隙流体以及它们之间的对垒结构。从数学和物理的角度看, 当固体颗粒和孔隙流体保持不变时, 即 C_s 和 C_l 保持不变, 声速的倒数应和孔隙度 n 呈线性关系。将本次测量的数据进行线性回归发现, 沉积物的孔隙度与声速的倒数呈较好的线性关系(图 5), 验证了上述猜测, 也从反面证实了南沙海域海底沉积物中的固体颗粒与孔隙流体基本保持不变。

3.4 影响声速的其他因素

声波在沉积物中传播时, 除了沉积物孔隙因素外, 颗粒间接触、对垒和排列、流体含量和性质也会影响到声波的传播。在沉积物物理性质中, 这些影响表现为密度、中值粒径、含水量等对声速的影响。国内外的学者对此进行实验研究表明, 密度以及中值粒径与沉积物声速呈正比相关关系; 含水量与沉积物声速呈反比相关关系。

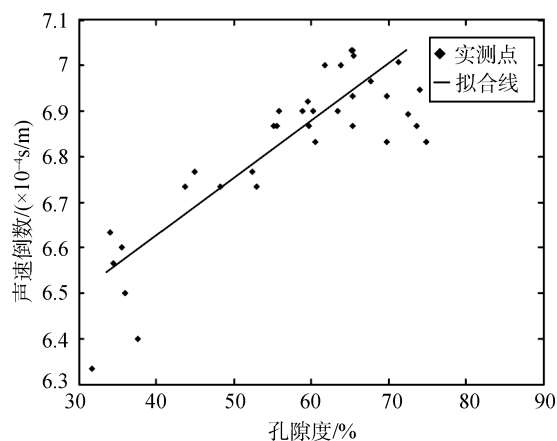


图 5 声速的倒数与孔隙度关系图

Fig. 5 The reciprocal of Sound velocity and porosity relationship diagram

除了沉积物物理参数外, 还有其他影响沉积物声速的因素。程净净^[23]对沉积物中的流变性参数进行了相关研究, 她认为塑限、液限和塑性指数与压缩波速成反比相关关系。阚光明^[24]对温度和静水压力进行了相关实验, 研究表明随着温度增加, 声速呈增大趋势; 而静水压力对海底沉积物声速的影响还未有较为一致的结论。

此外, 实验室直接测量声速时, 样品由海底取样并搬运至实验室, 这种方法改变了沉积物所在的真实环境, 而且取样过程中也会不可避免地对沉积物产生扰动, 使测得的海底沉积物声学参数值与真实值有较大的误差。为了得到高精度的海底沉积物声学参数值, 应积极研究海底沉积物声学原位测量技术^[25-29]。海底沉积物声学原位测量技术, 是利用原位测量仪器直接测量声波在沉积物中的传播, 避免了沉积物所处的温度、压力等周围环境变化引起的测量误差, 也避免了样品取样和搬运对沉积物造成的扰动, 测量结果较取样测量更加准确可靠。

4 结论

本文通过对南沙海域表层沉积物声速和孔隙度测量分析主要得到以下两点结论: (1) 海底沉积物声速随着孔隙度的增加而减小, 当孔隙度增加到临界点 N 之后, 声速随着孔隙度的增加而变大。不同海域的临界孔隙度不同, 本海域的临界孔隙度值 N 为 67.80%。(2) 将建立的沉积物声速和孔隙度预测方程与 Hamilton 等学者建立的经验公式进行对比, 发现其他学者建立的公式对于本文的实测数据相关性较差, 说明预测方程之间存在差异, 各经验公式具有区域性, 需针对不同的海区建立相应的经验公式。

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]. 东海海洋, 2003, 21 (4): 26-33.
- [2] Hamilton E L. Geoacoustic Modeling of the Sea Floor [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68: 1313-1340.
- [3] Anderson R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[M]//Physics of sound in marine sediments. US: Springer, 1974: 481-518.
- [4] 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: 1536.
- [5] 卢博, 李赶先, 孙东怀, 等. 中国东南近海海洋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.
- [6] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物声速经验的方程分析和研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 43-50.
- [7] 周志愚, 杜继川, 赵广存, 等. 南海、黄海海底声速垂直分布的测量结果[J]. 海洋学报, 1983, 5(5): 543-552.
- [8] 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, 1997, 27(1): 77-81.
- [9] 吴世敏, 周蒂, 刘海龄, 南沙地块构造格局及其演化特征[J]. 大地构造与成矿学. 2004, 28(1): 23-28.
- [10] 胡昌华, 李国华, 周涛. 基于 MATLAB 7.X 的系统分析与设计小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [11] 高成, 董长虹, 郭磊, 等. MATLAB 小波分析与应用 (第 2 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [12] 曾洁莹, 邹大鹏, 吴百海, 等. 基于小波变换选择的海底沉积物声速分析技术[J]. 海洋技术, 2009, 28(6): 40-42.
- [13] 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.
- [14] 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, 3: 38-40.
- [15] 卢博. 海底浅层沉积物声速与物理性质[J]. 科学通报, 1994, 39(5): 435-437.
- [16] Hamilton E L. Elastic Properties of Marine Sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76 (2): 579-603.
- [17] 梁元博, 卢博. 海洋沉积物力学性质影响声速的物理机制[J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 111-119.
- [18] 周志愚, 孟金生. 由爆炸声反射波遥测海底表面稀薄层的某些参数[J]. 热带海洋, 1985, 4(2): 38-43.
- [19] 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.
- [20] Hamilton E L. Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75 (23): 4423-4446.
- [21] Wyllie M R J, Gregoy A R, Gardner G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media [J]. Geophysics, 1985, 23: 459-495.
- [22] 王方旗, 开发庆, 姚菁, 等. 基于时间平均的海底沉积物声速预测[J]. 海洋学报, 2012, 34(4): 84-90.
- [23] 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(41): 331-336.
- [24] 阚光明, 赵月霞, 李官保, 等. 南黄海海底沉积物原位声速测量与实验室声速测量对比研究[J]. 海洋技术, 2011, 30(1): 52-56.
- [25] 谷明峰, 郭常升. 海底底质声学性质及原位测量技术研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2007.
- [26] 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.
- [27] 李艳华, 郭常升, 李会银, 等. 海底沉积物声学性质原位测量系统海上试验研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(9): 55.
- [28] 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): 075-080.
- [29] 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.

Surface sediments acoustic velocity and porosity correlation in Nansha sea area abyssal region

HOU Zheng-yu^{1, 2, 3}, GUO Chang-sheng^{1, 2}, WANG Jing-qiang^{1, 2, 3}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jan., 6, 2013

Key words: Nansha sea area; marine sediment; acoustic velocity; porosity

Abstract: We used coaxial differential distance attenuation measurement to measure acoustic properties of Nansha sea area marine sediment on deck and calculate sound velocity, combined with laboratory measurement of sediment porosity, studied the correlation between submarine surface 100 cm sediment velocity and porosity, set up an empirical formula by using porosity to predict submarine sediment velocity, and found the sediment critical porosity in Nansha sea area is 67.8%. Comparing with other formulas built by Chinese or foreign scholars, we found there is difference between the prediction equations, suggesting that there is difference between different sea sediment acoustic property, and the experience formula has regional restriction. In addition, some other factors influencing sound velocity were also analyzed. This work is of great significance to study and establish the sound field environment of the South China Sea.

(本文编辑: 刘珊珊)