

# 北部湾南部重力柱状样的 MSCL 地声学性质测量及分析

唐 诚<sup>1</sup>, 郑向阳<sup>1</sup>, 李艳芳<sup>1</sup>, 刘 欣<sup>1</sup>, 夏 真<sup>2</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

**摘要:** 利用钻孔多参数连续记录仪(multi-sensor core logger, MSCL), 对在南海北部湾南部海区所取得的 6 个孔重力柱状样进行了测量, 获得了连续 P 波波速、湿密度和孔隙度数据。在室内实验室对柱状样分样之后的沉积物样品进行了孔隙度与湿密度的测定。利用不同的统计回归方法对所获得的 6 个柱状样的孔隙度与 P 波波速进行相关分析, 并对比室内测量的 P 波波速、湿密度、孔隙度, 建立了基于孔隙度数据对沉积物 P 波波速进行预测的方法, 对 MSCL 测量方法的优缺点进行了讨论。结果表明, MSCL 测量结果与实验室柱状样测定结果较为吻合。样品所在深度对声速的变化影响不大。孔隙度与声速的多项式回归, 样条插值回归和 GAM 模型回归都获得了较高的相关系数, GAM 模型可以提供一个较为接近测量值的声速预测方法。MSCL 用来测量海底沉积物, 可以获得大量的高密度、高精度的沉积物地声学及其他参数数据, 但是, 如果空气混入沉积物样品中则会导致 MSCL 测量结果失真。该研究为使用 MSCL 在区域海底地声学性质、恢复区域海洋沉积历史、海底地声学模型建立等研究提供了参考。

**关键词:** 北部湾南部; 地声学性质; 重力柱状样; 钻孔多参数连续记录仪(MSCL)

**中图分类号:** X834      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3096(2019)10-0088-08

**DOI:** 10.11759/hyqx20190316001

海底沉积物是一种松散的框架结构的弹性介质, 其地声学性质包括沉积学、土力学、声学的相关参数, 如 P 波波速、孔隙度、含水率、湿密度等, 是海底沉积物样品分析测试的重要项目, 通过研究沉积物声学性质与物理性质之间的相互关系, 可以对其地声学性质进行预测, 建立正确的海底地声学模型和波动方程。传统的地声学性质测量方法是, 在实验室内对海上获得的沉积物样品(如重力孔)分样后, 测得沉积物的声速、声衰减、密度、孔隙度等参数<sup>[1-2]</sup>。在国内, 主要利用不同类型的声波参数测定仪对沉积物样品进行声速测量<sup>[3-5]</sup>。世界各地的实验室已经利用传统的方法获得了大量数据并建立了相关的经验模型<sup>[6-8]</sup>, 但其也有不足之处, 首先分样会对海底的沉积物样品造成破坏, 导致获得的数据精度受到影响, 其次它不能对所获得重力孔进行高分辨率(毫米-厘米级别)的连续测量, 此外, 传统方法不能同时获得多个类型数据<sup>[9]</sup>。钻孔多参数连续记录仪(multi-sensor core logger, MSCL)可以弥补这些方面的不足, 并且已经获得了越来越广泛的应用<sup>[10]</sup>。本文利用 MSCL 设备对在南海北部湾南部海域所获取的重力

柱状样进行了测量, 获得了沉积物声速、湿密度和孔隙度参数, 并与用传统方法在实验室内测得的沉积物样品的含水率、孔隙度进行了对比, 对 MSCL 所获得的地声学参数进行了统计分析, 对沉积样品的 MSCL 的测量及数据处理等进行了探讨。这些研究将会为使用 MSCL 测量区域海底地声学性质、恢复区域海洋沉积历史、海底地声学模型反演等研究提供有用的依据。

## 1 研究区概况

北部湾位于南海古地台北部, 海底平坦, 坡度较缓, 研究区域内南北各有两个水深分别为 40 m, 60 m 等深线的台地, 中部区域大部分为 80 m 等深线, 是一

收稿日期: 2019-03-16; 修回日期: 2019-06-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530966); 国家自然科学基金项目(41006055); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB453301)

[Foundation: Key Program of National Natural Science Foundation of China, No. 41530966; National Natural Science Foundation of China, No.41006055; National Key Basic Research Program of China (973), No.2015CB453301]

作者简介: 唐诚(1975-), 男, 湖南怀化人, 博士, 主要从事海底地形地貌探测与研究, E-mail: ctang@yic.ac.cn

个低洼的盆地区，是北部湾通向南海海盆的一个重要通道。该海域受东北季风影响，冬季环流为逆时针，夏季西南季风在北部湾产生一个顺时针环流，基本上长年为一个大的逆时针循环，流向不随季风而变，靠近海南岛部分有一个常年的沿岸流<sup>[11-13]</sup>。该区域内的沉积物主要是石英和长石碎屑以及钙质生物骨屑<sup>[14]</sup>，沿岸和岛屿周边海底沉积物颗粒较粗，主要为中-粗砂粒级，甚至有砾级沉积物<sup>[8]</sup>，在盆地中部主要为粉砂质沉积。MSCL 测量的 6 个孔(A 孔、B 孔、C 孔、D 孔、E 孔、F 孔)海底重力柱状样品来自南海北部湾的南部海域，107°~109°E，17°~19°N。

## 2 MSCL 测量方法概述

本项工作中所获得的重力柱状样长度大部分在 3 m 以上，采样管为 4 m 长 PVC 管，在海上获取柱状样之后，将 4 m 长的采样管切割成 1 m 长的柱状样进行冷藏封存，不足 1 m 的表层重力样样品根据其长度被单独切割封存，所有的样品按照取样顺序从海底到采样底部位置排列并做好标记，样品在冷库内封存。

当柱状样从冷库取出后，平置于 MSCL 测试平台上，步进电机驱动传动皮带以 0.5 cm/s 的步长速度推动样品通过传感器，温度探头实时记录下室内的温度，所有探头测量的数据通过电缆连接到电脑。MSCL 可以同时记录样品的 P 波、磁化率、伽马(Gamma)射线衰减等多个参数，在保持所获得样品测试数据的一致性和稳定性方面，具有较大的优势。

MSCL 的 P 波波速测量原理如图 1 所示，沉积物的 P 波波速( $V_p$ )通过计算样品管内沉积物的厚度  $X$  除以 P 波通过沉积物柱状样截面的时间  $t_T$  得到：

$$V_p = \frac{X}{t_T}, \quad (1)$$

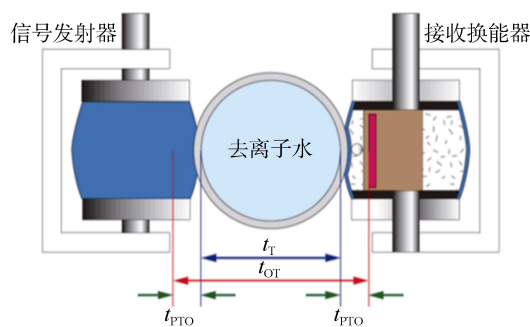


图 1 MSCL 仪器 P 波波速测量原理图

Fig. 1 MSCL schematic view of P-wave calibration

由于采样管的厚度和沉积物的厚度都是固定的，则由公式(2)可得时间  $t_T$ ：

$$t_T = t_{OT} - t_{PTO}, \quad (2)$$

其中， $t_{OT}$  为声波通过换能发射器与接受器之间的总时间， $t_{PTO}$  为声波通过沉积物之外的额外延时。

MSCL 系统采用一个注满水的相同直径的采样管来对  $t_{PTO}$  进行换算：

$$t_{PTO} = t_{OT} - \frac{D-W}{V_T}, \quad (3)$$

其中， $W$  是用于测量的采样管壁的厚度， $D$  是发射和接收换能器之间的距离， $V_T$  是特定温度下静止的水中的声速，用该方法可以将不同温度下测量的 P 波波速校正到同一温度下<sup>[15]</sup>。

同时可以测量的参数还包括衰减，通过该参数换算沉积物的密度如下：

$$\rho = \frac{1}{\mu d} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (4)$$

这里  $\rho$  是沉积物的密度， $u$  是衰减系数， $d$  是沉积物的厚度， $I_0$  是伽马源的强度， $I$  是通过沉积物样品后所测量得到的伽马强度。还可以通过伽马射线强度来计算孔隙度：

$$\Phi_{FP} = \frac{(\rho_{MGD} - \rho_{GD_1})}{(\rho_{MGD} - \rho_{WD})}, \quad (5)$$

$\Phi_{FP}$  是沉积物的孔隙度， $\rho_{MGD}$  是矿物颗粒的密度，其值根据沉积物矿物颗粒的不同而相应地变化，通常取值为 2.65 g/cm<sup>3</sup>， $\rho_{GD_1}$  是伽马射线所获得的密度， $\rho_{WD}$  是液态物质的密度，通常是 1.02 g/cm<sup>3</sup>，MSCL 系统通过软件将测量的结果经过计算和校正转换成湿密度、孔隙度输出。

## 3 MSCL 的测量结果

### 3.1 P 波波速与孔隙度、湿密度的关系

海底沉积物的声速与沉积物物理参数的关系，前人根据测量的结果给出了二维图解与回归方程，图 2a 显示了 6 个柱状样的沉积物 P 波波速与孔隙度的散点图、世界范围内的陆架区沉积物孔隙度与声速数据<sup>[1-2]</sup>，及我国东南沿海海洋沉积物<sup>[16]</sup>的 P 波波速与孔隙度的数据对比、相关学者建立的声速预报的回归曲线<sup>[1, 7, 16-18]</sup>。图 2b 为沉积物湿密度与测量声速的散点图，及从文献资料中所获得的陆架区声速与沉积物湿密度数据<sup>[1]</sup>，及相关的经验方程曲线。从图 2 中可以看到，MSCL 较传统方法更准确，但还是很难反演解释柱状样的声速与孔隙度、湿密度数据的关系。

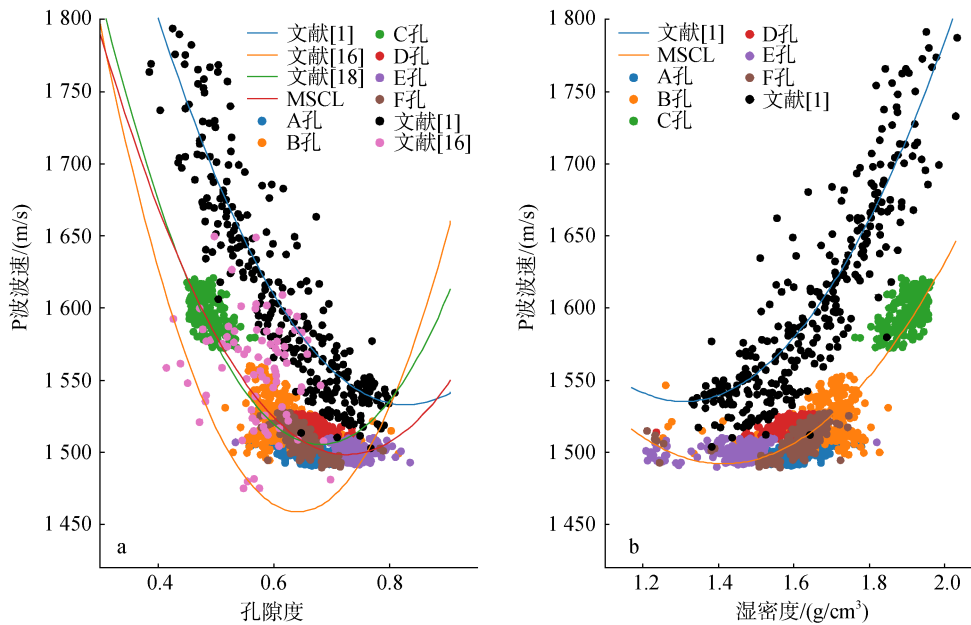


图 2 孔隙度、湿密度与 MSCL 声速测量相互关系

Fig. 2 The interrelation of MSCL with porosity and that with moisture density

### 3.2 MSCL 测量结果与实验室所测孔隙度、湿密度的关系

孔隙度的实验室测量主要是通过测量沉积物体积、质量、密度、含水量等物理量运用计算公式得到<sup>[17]</sup>。选取柱状样 B 孔在 MSCL 测试之后再环刀法对沉积物的湿密度、孔隙度进行测量<sup>[19]</sup>。采样管被水平剖开均匀切割成 2 部分，其中的一半按每 2 cm 间隔进行取样，垂直下压沉积物原状样品直至容器内充满沉积物，密封处理后用电子天平称质量并记录（精确到 0.01 g），放入低温冷冻 24 h 后取出，用真空干燥设备对样品中的水分进行抽真空排除水分，再次对样品进行称质量并记录，称取饱和沉积物的质量后，在温度 105~110℃ 下烘干至恒质量，获得沉积物固态干燥状态下的质量，可通过计算获得沉积物的密度、含水率和孔隙度。同深度的 MSCL 测量结果与实验室内测得的柱状样 B 孔的孔隙度、湿密度对比，如图 3 所示。其中，两种孔隙度的相关系数为 0.71，两种湿密度的相关系数为 0.55，相比之下，MSCL 测量结果与实验室内测定的孔隙度更为吻合。

## 4 基于 MSCL 测量数据的统计分析

MSCL 在测量过程中，经常会有不同程度的数据“缺失”情况，原因是由于柱状样内混入了空气或

者液体，造成沉积物与管壁之间不能紧密贴合，P 波信号会发生漂移，使得测量结果在设定的沉积物声速合理范围之外，因而不被系统显示。如图 4a 和图 4c 所示，柱状样 E 孔，中部 -1.5~ -0.25 m 和 F 孔小于 -1.4 m 部分的声速都有不同程度的缺失。但是，图 4c 和图 4d 表明 MSCL 所获测得的孔隙度数据较为连续，因此需要通过统计方法对柱状样的声速及其他参数进行分析，找出规律并对声速进行预测。

柱状样的声速和孔隙度频率直方图及密度分布曲线，如图 5 所示。可看到两者基本符合正态分布类型，频率分布直方图中所有矩形面积之和为 1，密度分布曲线与 x 轴之间的面积为 1。其中，P 波波速的分布范围主要集中在 1 470~1 530 m/s 和 1 580~1 620 m/s 两个区间；孔隙度作为解释变量也有两个对应的集中分布区间，分别在 0.4~0.5 和 0.6~0.75。

对 MSCL 测量的 6 个重力孔的结果共约 1 500 组有效数据进行回归分析，将数据进行随机拆散，80% 作为训练样本用于建立回归预测模型，剩余的 20% 数据用来作为测试样对回归模型进行验证，分别选用了多项式回归 (polynomial regression)，样条函数回归 (spline regression)，LOG 回归 (log transformation) 和广义加性模型 (GAM model) 4 种不同的回归方法进行比较。

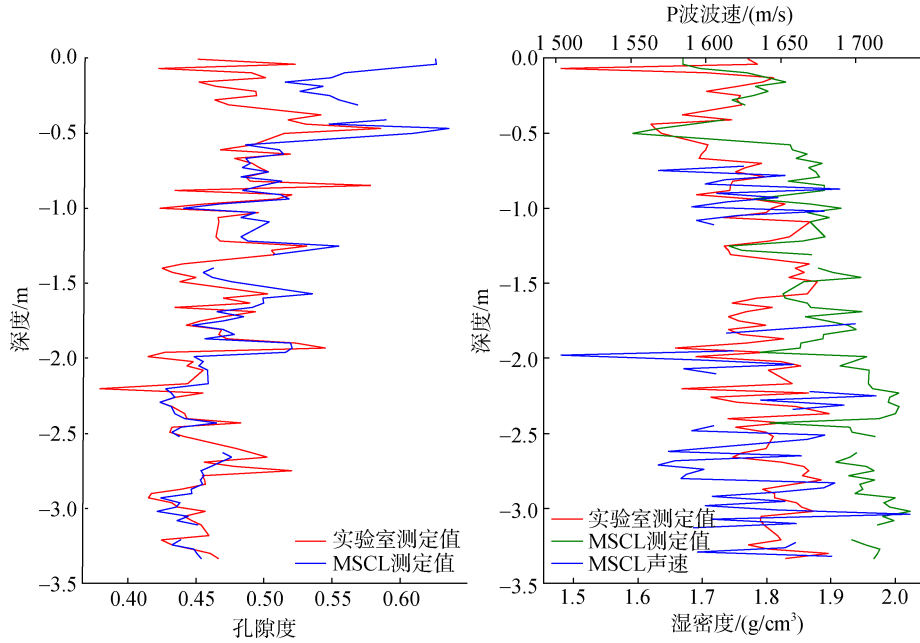


图3 B孔孔隙度、湿密度的MSCL测量结果与实验室分样测量结果对比

Fig.3 Comparison of MSCL measurement results of core B with the laboratory results of porosity and wet density

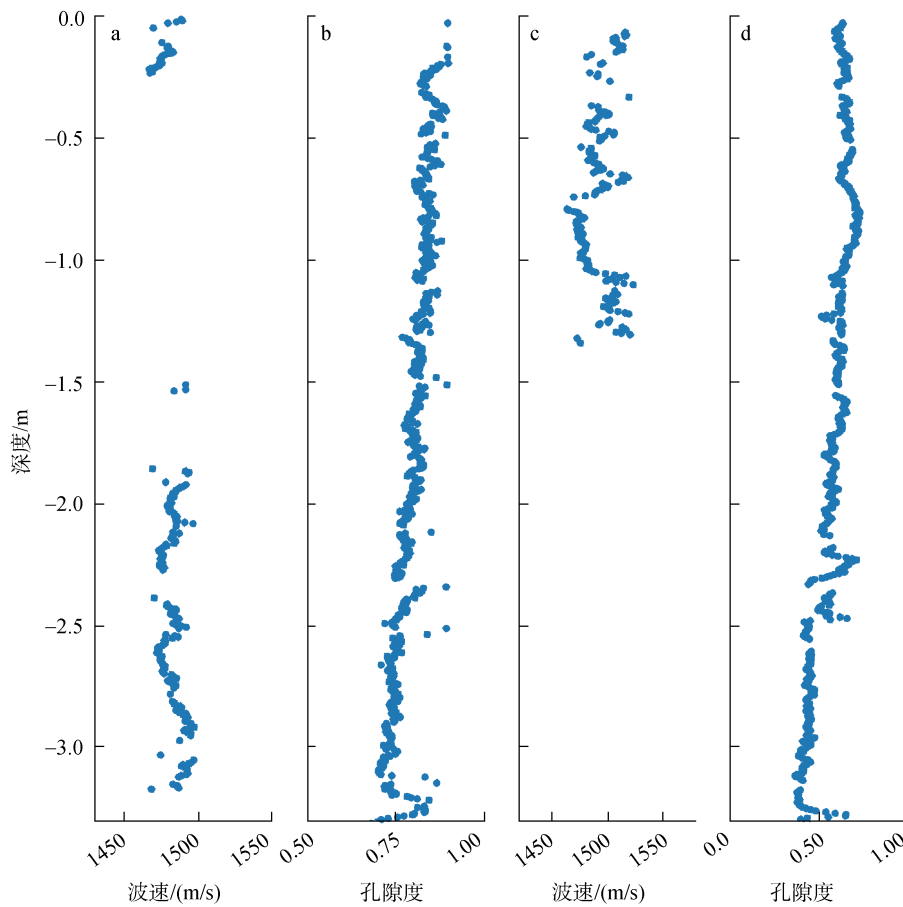


图4 MSCL实测的柱状样声速与孔隙度

Fig.4 The measurement results of porosity and p wave speed of gravity core

a: E孔波速; b: E孔孔隙度; c: F孔波速; d: F孔孔隙度

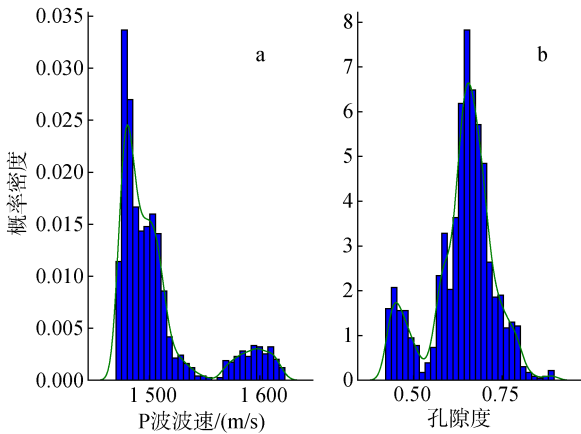


图5 MSCL 实测的柱状样概率密度分布直方图与分布曲线  
Fig. 5 The probability density and density curve of gravity cores

对沉积物声学性质的多项式回归分析一般是利用最小二乘法, 其中二次方程回归是比较常用的手段, 基于 MSCL 数据得到声速与孔隙度的回归方程如下:

$$C_p = 2245 - 20.59n + 0.1386n^2, \quad (6)$$

其中,  $C_p$  为声速,  $n$  为孔隙度, 所得到的回归曲线如图 6a 所示, 其均方误差根(RMSE)为 12.907, 相关系数  $R^2$  为 0.89, 对比前人对孔隙度与声速的回归分析

成果, 可以看到该模拟结果与邹大鹏<sup>[18]</sup>的回归方程较为相近。同样也可以对声速与湿密度的关系进行回归分析, 可以得到:

$$C_p = 2139 - 963.55d + 348.47d^2, \quad (7)$$

其中,  $d$  为湿密度, 单位为  $g/cm^3$ 。

样条插值法是一种以可变样条来做出一条经过一系列点的光滑曲线的数学方法<sup>[20]</sup>, 对孔隙度与声速的关系进行样条插值回归, 所得预测曲线如图 6b 所示, 其均方误差根为 12.68,  $R^2$  为 0.89。使用对数转换方法对孔隙度与声速的关系进行回归分析, 所得到的预测曲线如图 6c 所示, 可以看到对数转换方法并不能很好地反应两者之间的关系, 其均方误差根为 17.95,  $R^2$  为 0.787, 预测效果较差; GAM 模型是一种非参数回归模型, 适用于响应变量与解释变量之间的关系式非线性和非单调的数据分析<sup>[21]</sup>, 其最大的优点在于不需要提前确定模型的函数形式, 而是通过数据本身反映出来, 具有高度的灵活性, 在渔业资源、气候监测、医学研究等诸多领域已经取得了广泛的应用<sup>[22]</sup>。通过建立解释变量孔隙度与响应变量声速的关系, GAM 模型可以获得解释变量的平滑回归曲线, 如图 6d, 函数的均方误差根值为 12.47,  $R^2$  为 0.9, 为 4 个回归模型中效果最好的。

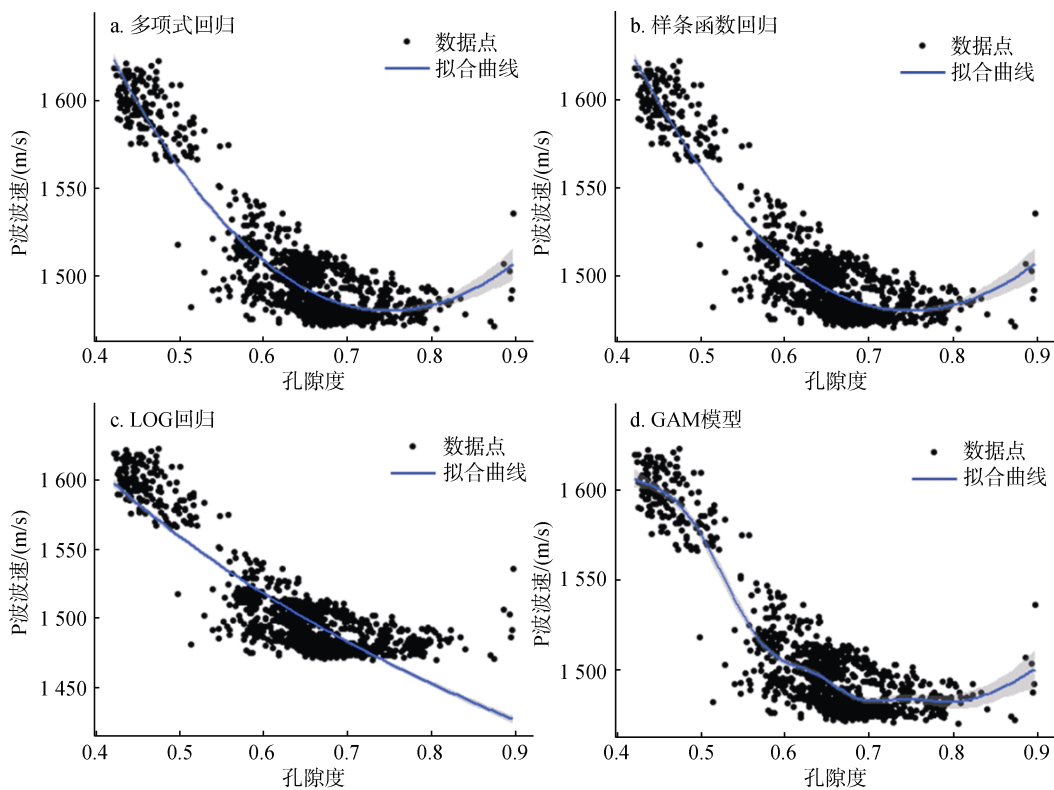


图6 不同回归模型的孔隙度对于重力样声速变化的预测曲线对比  
Fig.6 Effect of influencing factors on the variation of P wave velocity

图7是通过GAM模型所获得的孔隙度和样品深度对应声速的影响效应图,孔隙度对于声速的自由度是8.58,其参考自由度是8.78。当自由度大于1,表明函数是非线性曲线方程,两者是非线性关系,值越大其非线性关系越显著,在 $P < 0.01$ 水平下为显著相关,孔隙度在0.3~0.7区间内,随着孔隙度的增加,声速呈递减趋势,孔隙度的变化与对于声速的影响比较明显,当孔隙度大于0.7时,声速值呈缓慢

的单调递增,显示在此区间外,孔隙度的变化对于声速的相关性显著降低。样品深度与声速变化呈一个非线性关系,随着深度的增加,声速没有明显的变化特征,在深度大于2.5 m时有一个小的波动,但是声速变化不明显,说明深度与声速的变化相关性不大。通过4个模型的MSCE和 $R^2$ (表1)对比,可以看到GAM统计模型对缺失的声速数据进行预测效果最好。

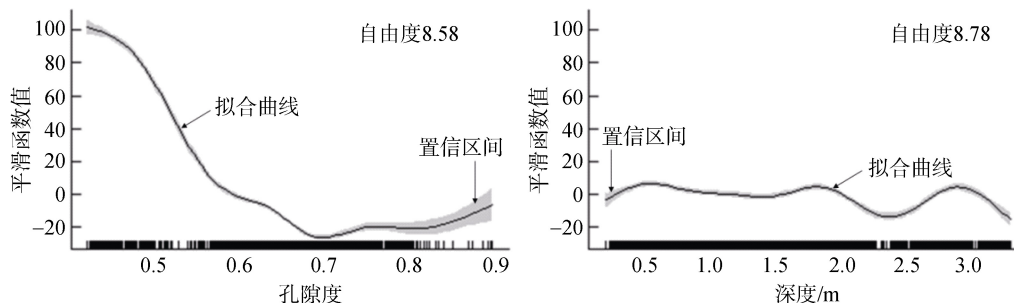


图7 孔隙度、样品深度对于重力样P波波速变化的影响效应

Fig. 7 Effect of influencing factors such as porosity and depth on the variation of P wave velocity

表1 不同声速预测模型的RMSE和 $R^2$ 比较  
Tab. 1 Comparison of RMSE and  $R^2$  for different sound velocity prediction models

模型	RMSE	$R^2$
多项式回归	12.901 7	0.890 15
样条插值回归	12.672 8	0.893 94
对数变化回归	17.950 2	0.787 01
GAM模型	12.470 1	0.902 33

## 5 讨论

MSCL 测量相对于传统的海底柱状样测量具有多种优势,其主要优点是可以在一次测量时同时获得多个柱状样参数,其中包括P波波速、孔隙度与湿密度。通过同一海域相近的重力柱状样MSCL测量和室内分析可以看到,MSCL的测量数据与实验室沉积物样品数据所展示的趋势基本一致,造成MSCL测量与实验室沉积样品测量结果差别的主要原因是样品取样后在运送实验室过程中受到扰动,较原位状态基本物理性质发生了较大的改变,尤其是声速测量结果会受到影响。因此,在有条件的情况下,实施沉积物的原位测量,可以避免样品取样和搬运对沉积物造成的扰动,其结果相对于实验室测量样品更加准确、可靠<sup>[23]</sup>。在海上现场取样后尽可能缩短样品测试时间,当不具备对沉积物声速进行原位测

量的条件时,取样后立即在船上实验室进行声速测量<sup>[24]</sup>,因此MSCL的安装及作业最好在有条件的船上实验室进行。

在海上采集重力样之后,样品分样之后沉积物靠近海底部分的样品往往难以准确获得样品并保存,应该采取多管柱状样,来获取这一层位的地声学数据。在沉积物柱状样的测量过程中,柱状样通常是水平放置通过传感器<sup>[24-26]</sup>,在海水与沉积物的界面往往是高孔隙度的沉积物,其声速会低于饱和状态下的沉积物声速<sup>[26]</sup>,水平放置柱状样的海底表层部分由于会有残留海水的存在,样品受到重力作用与管壁的接触会出现空隙,会造成测量声速结果不准,在海上采集的多管柱状样品往往难以获得准确的数据,因此应该改变这种测量方式,保持柱状样的垂直状态,使用传感器或者柱状样垂直移动来测量地声学参数更为准确、可靠。引入统计模型方法对于海底沉积物声速与其他地声学参数的非线性关系预测有一定意义,但是需要更多的数据样本来对预测结果进行验证。

## 6 结论

MSCL 是用来测量海底沉积物地声学性质的有利工具,可以获得大量的高密度、高精度的沉积物地声学及其他参数数据,但是也应该看到MSCL的缺

陷, 由于沉积物样品混入了空气而导致测量结果失真, 造成这一现象的原因与现场的样品采集、保存等因素有关, 需要进一步改进现场采样、分样方法和 MSCL 的测量方法, 从而获得更加精确的数据。通过不同的统计回归模型对 MSCL 测量数据进行分析, 结果表明, 样品所在深度对声速的变化影响不大, 孔隙度与声速的多项式回归, 样条插值回归和 GAM 模型回归都可以得到一个较高的  $R^2$ , GAM 模型可以提供一个较为接近测量值的声速预测方法, 为区域海底地声学性质、恢复区域海洋沉积历史、海底地声学模型反演等研究提供依据。

#### 参考文献:

- [1] Edwiwn L H, Richard T B. Sound velocity and related properties of marine sediments[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(6): 1891.
- [2] Richard T B. Acoustic and physical property relationships in marine sediment[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 78(2): 616.
- [3] 卢博, 李赶行. 海底沉积物声学的现场测量和取样系统[J]. 海洋技术学报, 2000, 19(3): 31-33.  
Lu Bo, Li Ganxing. Acoustic field measurement and sampling system for seabed sediments[J]. Journal of Ocean Technology, 2000, 19(3): 31-33.
- [4] 卢博, 李赶先, 黄韶健, 等. 南海北部大陆架海底沉积物物理性质研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 48-55.  
Lu Bo, Li Ganxian, Huang Shaojian, et al. A study on physical properties of sediments on continental shelf seabed of the northern South China Sea[J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(3): 48-55.
- [5] 王琪, 刘雁春, 崔高嵩, 等. 关于海底沉积物声特性实验室直接测量方法的探讨[J]. 海洋技术学报, 2007, 26(4): 37-39.  
Wang Qi, Liu Yanchun, Cui Gaosong, et al. Discussion on directly measuring method of acoustic properties for sea bottom sediments in laboratory[J]. Journal of Ocean Technology, 2007, 26(4): 37-39.
- [6] Edwiwn L H. Compressional-wave attenuation in marine sediments[J]. Geophysics, 1972, 37(4): 620.
- [7] 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.
- [8] 刘强, 卢博. 南海浅海海底沉积物的声衰减[J]. 海洋学报, 2008, 30(4): 48-55.  
Liu Qiang, Lu Bo. Seabed sediment acoustic attenuation in shallow seas of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(4): 48-55.
- [9] Monika B. Physical properties of marine sediments[C]// Roy C. Marine Geochemistry. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006: 27-71.
- [10] Best A I, Gunn D E. Calibration of marine sediment core loggers for quantitative acoustic impedance studies[J]. Marine Geology, 1999, 160(1-2): 137-146.
- [11] 孙洪亮, 黄卫民. 北部湾潮汐潮流的三维数值模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 1-8.  
Sun Hongliang, Huang Weimin. Three-dimensional numerical simulation for tide and tidal current in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(2): 1-8.
- [12] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11-24.  
Xia Huayong, Li Shuhua, Shi Maochong. A 3-D numerical simulation of wind-driven currents in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(6): 11-24.
- [13] 胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 64-71, 88-97.  
Hu Jianyu, Yang Shengyun. Collected Papers of Beibu Gulf Marine Science[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 64-71, 88-97.
- [14] 陈丽蓉, 张秀荣. 北部湾沉积物中矿物组合及其分布特征[J]. 海洋学报, 1986, 8(3): 340-346.  
Cheng Lirong, Zhang Xiurong. Mineral assemblages and their distribution characteristics in the Beibu Bay sediments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(3): 340-346.
- [15] Leroy C C. Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in seawater[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 46(1B): 216.
- [16] 卢博, 梁元博. 中国东南沿海海洋沉积物物理参数与声速的统计相关[J]. 中国科学: 化学 生命科学 地学, 1994, 24(5): 110-114.  
Lu Bo, Liang Yuanbo. The statistical correlation between the physical parameters of Marine sediments and the sound velocity in the southeast coast of China[J]. Science in China, 1994, 24(5): 110-114.
- [17] 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.
- [18] 邹大鹏, 吴百海, 卢博, 等. 海底沉积物物理参数的声学反演模式[J]. 海洋学报, 2008, 30(5): 17-22.  
Zou Dapeng, Wu Baihai, Lu Bo, et al. Acoustic inversion models of physical parameters of seabed sediments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(5): 17-22.
- [19] 罗云, 侯正瑜, 田雨杭, 等. 南海海底沉积物声学物理参数测定的温度和时间优化研究[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(4): 81-88.  
Luo Yun, Hou Zhengyu, Tian Yuhang, et al. Optimization of temperature and time of acoustic physics parameters of seafloor sediment in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(4): 81-88.
- [20] Bruce P, Bruce A. Practical Statistics for Data Scientists:

- 50 Essential Concepts[M]. USA: O'Reilly Media, Inc., 2017.
- [21] 贺祥, 林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化的影响[J]. 环境科学, 2017, 38 (1): 22-32.  
He Xiang, Lin Zhenshan. Interactive effects of the influencing factors on the changes of PM<sub>2.5</sub> concentration based on GAM Model[J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 22-32.
- [22] 欧阳芳, 戈峰. 基于广义可加模型的昆虫种群动态非线性分析及 R 语言实现[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(4): 1170-1177.  
Ouyang Fang, Ge Feng. Nonlinear analysis of insect population dynamics based on generalized additive models and statistical computing using R[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2013, 50(4): 1170-1177.
- [23] 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): 88-93.  
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]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(3): 88-93.
- [24] 李官保, 阚光明, 孟祥梅, 等. 环境条件变化对海底沉积物实验室声速测量结果的影响[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(3): 360-366.  
Li Guanbao, Kan Guangming, Meng Xiangmei, et al. Effect of the condition changes on the laboratory acoustic velocity measurements of seafloor sediments[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(3): 360-366.
- [25] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物声速实验室测量结果校正研究[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(1): 27-31.  
Zou Dapeng, Wu Baihai, Lu Bo. A study on correction of acoustic velocity in seafloor sediments measured in laboratory[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(1): 27-31.
- [26] Edwiwn L H. Low sound velocities in high-porosity sediments[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(1): 16.

## Geoacoustic properties measurement and analysis of gravity cores using MSCL in the Southern Beibu Gulf

TANG Cheng<sup>1</sup>, ZHENG Xiang-yang<sup>1</sup>, LI Yan-fang<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, XIA Zhen<sup>2</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Guangzhou Marine Geology Survey, Ministry of Land Resources, Guangzhou 510075, China)

**Received:** Mar. 16, 2019

**Key words:** the Southern Beibu Gulf; geoacoustic properties; sediment gravity core; multi-sensor core logger

**Abstract:** Geo-acoustic properties such as P-wave velocity, wet density, and fractional porosity can be continuously measured using multi-sensor core logger (MSCL), which has widespread use globally. Six gravity cores from the Southern Beibu Gulf, the South China Sea were measured in the laboratory using MSCL for P-wave speed, wet density, and porosity parameters. Both the wet density and porosity of one core were also measured after sub-sampling. Results of the comparison of the two data sets show a reasonable match, and the depth of the sample has little effect on the change in sound velocity. Polynomial, Spline interpolation, and GAM model regression can obtain a higher  $R^2$ . GAM model can provide a sound velocity prediction method that is close to the measured value. The advantage and disadvantage of using MSCL as a tool for geo-acoustic measurement is that it can obtain a large number of high-density and high-precision data for sediment acoustics and other parameters. However, if air is mixed with sediment samples, it will distort the results of MSCL. This work can offer a sound background for regional ocean sediment development, regional environmental comparisons, and bottom geo-acoustic models, and for the future effective use of MSCL.

(本文编辑: 刘珊珊)