

小尺度海底沉积物的声衰减特性研究*

龙建军^{1,2}, 董全财², 吴金萍²

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

2. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

摘要: 为研究小尺度海底沉积物样品的声衰减特性, 作者提出了用声学探针测量海底沉积物声波幅值的新方法, 对沉积物样品扰动小, 两个测量点的距离可小于波长, 为海底沉积物微观声衰减测量提供了新手段。作者用小于波长的间隔逐点测量了沉积物的压缩波幅值, 数据分析表明沿沉积物柱状样全长的声衰减满足指数衰减模型。目前主要用同轴差距衰减测量法获得海底沉积物声衰减数据, 但该方法不能辨识声衰减模型, 因此不同海区的测量结果难以建立联系。对此作者又提出用声吸收系数反演的幅值比与声衰减系数反演的 R 值(两种幅值比的比值)作评价依据, 分析了垂直轴差距衰减测量法获得的南海海底沉积物声衰减测量数据, 发现部分沉积物样品声衰减的 R 值远大于 1, 其声衰减不满足指数衰减模型。在声衰减满足指数衰减模型的条件下, 用 Hamilton 的声衰减和频率经验公式预报的南海沉积物声衰减比与作者用声学探针测量海底沉积物所得的声衰减比对比, 通过对 R 值分析得出 Hamilton 的声衰减和频率经验公式可以预报南海沉积物声衰减比的范围。作者提出的声学探针测量海底沉积物声衰减的方法的优点是既能获得声衰减数据又能辨识声衰减模型, 不同海区测量的沉积物声衰减比可用 R 值建立联系。

关键词: 海底沉积物; 小尺度样品; 小距离; 声衰减; 声衰减测量

中图分类号: P733.2; P736.22 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)02-0028-06

Acoustic attenuation of seabed sediment at small scale

LONG Jian-jun^{1,2}, DONG Quan-cai², WU Jin-ping²

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510060, China

Abstract: In order to study of sound attenuation characteristics of seabed sediment at small scale, an original method for measuring acoustic attenuation of sediment within a small-gap cross section is put forward. There are small disturbances in the sediment samples during the course of measurement by the method. The sound attenuation of seafloor sediment can be measured at two test points; the distance of them is less than one wavelength, which provides a method for finding out how microstructures work in wave attenuation of seabed sediment. Amplitudes of compression wave in sediment columns were measured point by point at the interval less than one wavelength in the study; and it is shown that negative exponential function is a type of acoustic attenuation model for sediment in its full length. Data of wave attenuation of seafloor sediments are mainly obtained by coaxial gap measurement method at present, but the sound attenuation model is not identified by using the method; so it is difficult to establish the relationship of results of wave attenuation of seafloor sediments taken from different sea areas. In this paper, an evaluated R , which result from the ratio of the amplitude inversed by the sound absorption

收稿日期: 2011-06-28; 修订日期: 2011-11-30。卢冰编辑

基金项目: 中国科学院边缘海地质重点实验室项目 (MSG09-04); 国家自然科学基金项目(40876018、41176034)

作者简介: 龙建军(1960—), 男, 广西玉林市人, 博士, 副教授, 目前主要从事应用声学及海洋声学检测技术研究。E-mail: longjj@gdut.edu.cn

*本文的研究过程中得到中国科学院南海海洋研究所卢博研究员的帮助, 在此谨表谢意! 感谢广州市番禺奥迪威电子有限公司赠送了研究用的压电换能器。

coefficient divided by the ratio of the amplitude inversed by the sound attenuation coefficient (the ratio of two amplitude ratios), is proposed to be an evaluation criterion. After the data analysis of sound attenuation of seabed sediments from the South China Sea, which were obtained with measurement method of sound attenuation between the gap along the vertical axis, it was found that the evaluated R 's of sound attenuation from part of the sediment samples were much larger than one and their sound attenuations did not meet the exponential function of negative index. Under the conditions of the exponential function of negative index with which sound attenuation of seabed sediments was satisfied and in comparison with the evaluated R 's of sound attenuation of seabed sediments from the South China Sea predicted with Hamilton's empirical formula of sound attenuation and frequency and the ones measured with acoustic probe in our project, it was found that the range of ratios of sound attenuation of seabed sediments from the South China Sea can be predicted by Hamilton's empirical formula of sound attenuation and frequency. The advantage of measurement by the acoustic probe is in both accessing acoustic attenuation data and identifying sound attenuation model of seafloor sediments, and then the relationship of measured sound attenuation of seafloor sediment from different sea areas can be established with their evaluated R 's.

Key words: seabed sediment; small distance; small scale sample; acoustic attenuation; acoustic attenuation measurement

声速、声衰减是海底沉积物声学研究中的两个主要声特性参数。沉积物声衰减直接反映出海底对声波传播和地震波作用过程的影响,一直是重要的海底沉积物声学参数。Hamilton^[1]建立了沉积物声衰减与频率的经验公式。通过对海底沉积物样品室内分析,得出除了孔隙度之外,沉积物结构、颗粒堆垒、颗粒特性、孔隙的几何特性、微层理、微裂隙、测量频率等因素与沉积物声学特性都有密切关系^[2-6]。海底原位测量表明海洋沉积物的声频散和声衰减特性与沉积物特性也有密切相关^[7-9]。海底沉积物声学物理的理论研究也十分注重沉积物结构对声波衰减的影响^[10-11]。可见沉积物的宏观声学特性在很大程度上受到微观结构的系统状态和行为的控制。目前的沉积物声学特性实验室研究,主要对海底沉积物柱状样品采用声波透射法测量。测量时,换能器安装在柱状样品两端,而且与柱状样品保持同轴状态^[12],或者在这种方法基础上的改进^[6, 13]。这些方法测量的声学特性数据是换能器之间沉积物的综合效应;测量声衰减时需要把沉积物样品切为两段。测量两个短距离(如在一个波长内)横截面间的沉积物的声速与声衰减会带来大的扰动。

为了在微观结构上研究沉积物的声学物理本质,目前的沉积物声衰减实验室测量方法难以实现。本文提出了小距离横截面的声波信号测量方法。采用此方法沿柱状样品轴向长度测量海底沉积物声波信号,分析了海底沉积物声衰减特性。

1 小尺度样品声衰减测量方法

1.1 声学探针结构与工作原理

本文研制了一种特殊结构的声学探针,用来测量柱状沉积物的声信号,图 1a 为其结构示意图,图

1b 为其实物照片。

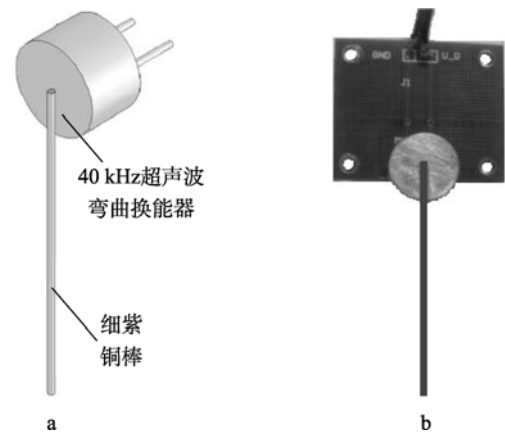


图 1 声学探针结构示意图(a)和实物照片(b)

Fig. 1 Three-dimensional sketch (a) and photo (b) of acoustic probe

1.2 声学探针测量海底沉积物声衰减的方法和实验系统简介

沿单方向传播的时间谐振平面波,若仅考虑介质中质点振动幅值 A 随传播位移 x 的衰减,可表示为^[14]:

$$A = u_0 e^{-\beta x} \quad (1)$$

式中 u_0 为初始振动幅值, β 为介质的吸收系数。

图 2 为海底沉积物声衰减测量方法和实验系统。测量每个位置的幅值 $A(i)$, $i=1, 2, \dots, N$ 。运用最小二乘法^[15]可以得到 β , 单位为 $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 。吸收系数 β 与声衰减系数 α (单位: $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$) 的关系^[16]为:

$$\alpha = 8.68\beta \quad (2)$$

相邻两个测量点的间距 Δx 满足下式^[17]

$$\Delta x \leq c_p / (2f_p) \quad (3)$$

式中 c_p 为沉积物的声速, f_p 为声波频率。

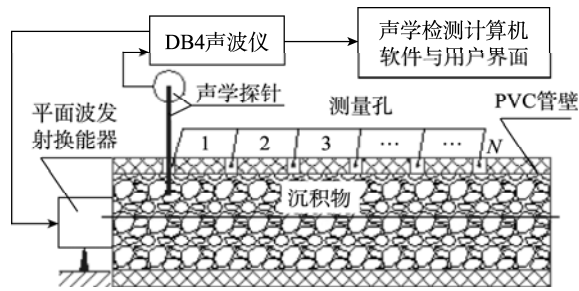


图 2 沉积物声衰减声学探针测量系统示意图

Fig. 2 System sketch for the acoustic probe

为测量沉积物不同方位的声学特性,管圆周上加工了 4 个孔,构成 4 组轴向测量孔(图 3)。

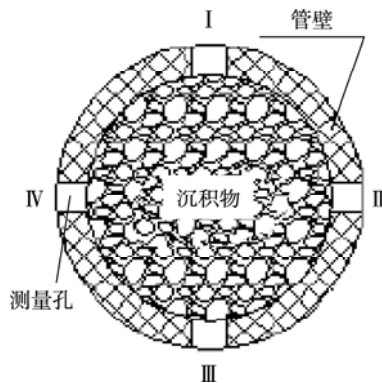


图 3 测量点圆周分布示意图

Fig. 3 Measurement points around the sediment column

2 南海海底沉积物声衰减测量结果

2.1 沉积物样品的物理性质

实验用的柱状样品是用箱式取样器在南海某海域获得的沉积物的重塑样,样品常温状态下物理性质见表 1。

2.2 探针插入沉积物深度相同时的测量结果

声学探针采用弯曲换能器,中心频率 $40 \pm 1.0\text{kHz}$,灵敏度 230mV 。细金属棒采用直径 1mm 、长 50mm 的紫铜棒。运用 DB4 声波仪常温下测量沉积物声波信号,测量实际主频为 39.3kHz 。根据式(3),

取 $f_p=39.3\text{kHz}$ 和 $c_p=1600\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,空间采样步长为 $\Delta x \leq 20.4\text{mm}$, Δx 用于确定图 2 中两个相邻测量孔的距离。时间采样步长为 $\Delta t \leq 1/(2f_p) = 12.7 \times 10^{-6}\text{s}$, Δt 表示声波幅值-时间波形图上两个采样点的时间间隔。对应的采样频率为 $f_s \geq 1/\Delta t = 78.6\text{kHz}$ 。1 号测量点靠近发射换能器,与发射换能器发射面沿样品轴向距离为 6.2mm 。

表 1 海底沉积物样品物理性质

Tab. 1 Physical properties of measured seabed sediments

参数名称	测量结果
长度/mm	600
直径/mm	70
孔隙度/%	66
含水量/%	61.61
湿密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1.72
沉积物类型	黏土质粉砂

在满足上述条件下,确定测量点的间距为 10mm ,时间采样步长为 $1\mu\text{s}$ 。本文测量了图 3 圆周上、组孔的声信号。取样塑料管上钻孔与加密封橡胶是在海底沉积物取样之前完成。声学探针插入沉积物 10mm 时,对第一组和第二组每个测量点进行 5 次测量,判读首波幅值(直达波波前的幅值),经平均处理得到测量结果。部分数据见表 2、表 3。

2.3 数据处理

第一组、第二组实验数据的曲线见图 4 和图 5。

由图可见,随着测量点远离声源,测量点的波幅减小呈指数函数规律。对第一组和第二组测量点的数据进行回归处理,方法参见文献[15]。结果见表 4。理论上,当发射换能器与柱状样品同轴时,即第一组和第二组测量点的声衰减测量值应该一致,但两者的测量结果有差异。

用旋转式黏度计测量了多个断面内位置与位置处沉积物的切变黏滞系数,发现在相同断面内

表 2 第一组测量点首波幅值 \bar{A} (单位: mV)

Tab. 2 Amplitude of the first group of measuring points (unit: mV)

测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}
1	5.9833	7	3.0000	13	3.3333	19	2.1167	25	1.4667
2	4.6833	8	3.0833	14	2.0500	20	1.6167	26	1.0167
3	4.6167	9	3.1333	15	2.3667	21	1.3667	27	1.0167
4	3.9500	10	3.0833	16	2.1667	22	1.3000	28	1.0667
5	4.4167	11	2.7333	17	1.5667	23	1.3000	29	0.9333
6	3.8000	12	2.8667	18	1.5667	24	1.2500		

表 3 第二组测量点首波幅值 \bar{A} (单位: mV)

Tab. 3 Amplitude of the second group of measuring points (unit: mV)

测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}	测量点编号	\bar{A}
1	ND	7	2.7333	13	1.7667	19	1.4000	25	ND
2	ND	8	3.4667	14	1.9000	20	1.1000	26	ND
3	ND	9	3.0333	15	1.5000	21	0.9667	27	ND
4	3.9333	10	2.6000	16	1.2333	22	0.9667	28	ND
5	3.0333	11	2.4333	17	1.3333	23	ND	29	ND
6	3.3333	12	1.9667	18	1.4000	24	ND		

注: “ND”表示无数据。

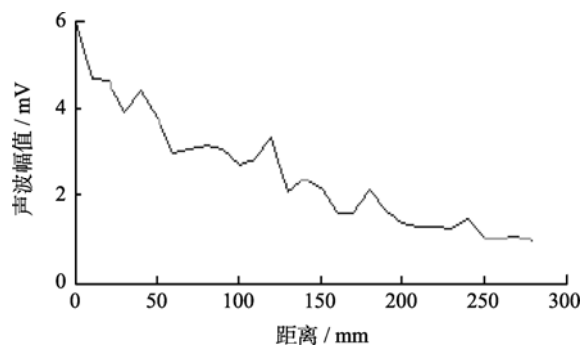


图 4 第一组测量点沉积物的首波幅值衰减曲线

Fig. 4 Sound amplitude attenuation from the 1st group of measuring points

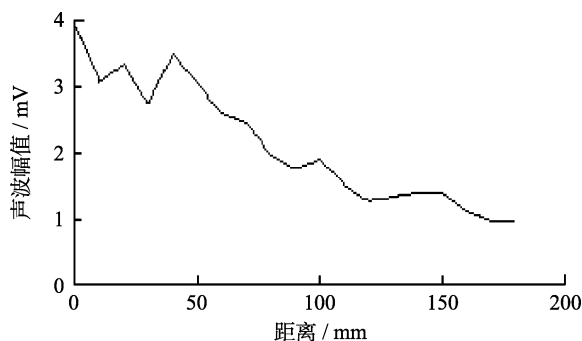


图 5 第二组测量点沉积物的首波幅值衰减曲线

Fig. 5 Sound amplitude attenuation from the 2nd group of measuring points

表 4 表 2 和表 3 的数据回归

Tab. 4 Regression of the data

参数	第一组数据 (表 2)	第二组数据 (表 3)
幅值衰减模型/mV	$5.18e^{-6.1376x}$	$3.88e^{-7.8271x}$
吸收系数 $\beta/(\text{Np}\cdot\text{m}^{-1})$	-6.1376	-7.8271
声衰减系数 $\alpha/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$	53.3103	67.9849
声衰减比 $k/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kHz}^{-1})$	1.3565	1.7299

位置 处切变黏滞系数大于位置 处的, 差异在 12%—17%之间。

海底沉积物的声传播可以用线性黏弹性模型描

述^[18]。文献[19]研究了饱和多孔介质的声衰减, 表明介质阻尼是影响声衰减的主要因素; 而介质阻尼与黏性有密切的关系。文献[20]表明声吸收系数 α_a 与切变黏滞系数成正比关系。其次, 已有学者发现抗剪强度在一个取样管柱状样品的断面内有显著的差别^[21]。切变黏滞系数与沉积物抗剪强度有正相关性, 可以说切变黏滞系数差别也会有类似现象。抗剪强度是静态量, 切变黏滞系数是动态量。可以判断沉积物切变黏性分布不均匀是造成位置 与位置 声衰减数量差异的主要原因。这表明, 沉积物动态物理性质分布不均匀对声衰减影响值得注意。

3 实验结果分析与对比

3.1 测量数据分析与沉积物声衰减模型讨论

设满足式(1)、(2)估计的声衰减模型为指数衰减模型, 衰减系数记为 α_e ; 根据衰减系数定义^[13] 估计的声衰减模型为一般模型, 衰减系数记为 α_p 。

若已知 α_p 和样品长度 $x_{i+1} - x_i$, 根据 α_p 定义可以反演出幅值比 $r_p = A(x_i) / A(x_{i+1})$ 。

若假定沉积物声为指数衰减模型, 在相同的条件下, 根据式(1)和(2)也可以反演出幅值比 $r_e = A(x_i) / A(x_{i+1})$ 。

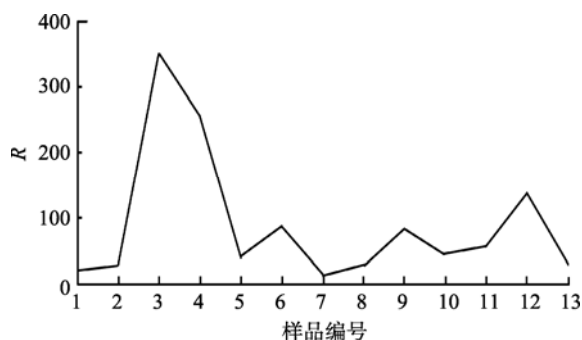
然后定义两种幅值比的比值为: $R = r_p / r_e$ 。即

$$R = 10^{\frac{\alpha}{20}(x_{i+1}-x_i)} / e^{-\beta(x_{i+1}-x_i)}$$

如果声衰减模型是指数衰减函数, 根据前述式(1)、(2)和 α_p 的定义, 经过推导可以得到两种幅值比的比值 R 为常数 1。

根据文献[22]中 100kHz 声波的衰减数据反演得到其 R 值的变化曲线(图 6)。

图 6 的 R 值从 12.4710 到 353.6173, 相差甚远。考虑测量误差的影响, 也不应相差如此大, 因此可以判断沉积物的声衰减模型不仅有指数衰减模型, 还应该有其他模型, 有待进一步的工作验证。

图6 R 值变化曲线Fig. 6 Curve of evaluated R

3.2 结果对比

Hamilton^[23]经过现场测量得出声衰减和频率间的关系为:

$$\alpha = kf^r \quad (4)$$

式中, α 为压缩波的衰减系数($\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$); k 为常数; f 为声波频率(kHz); r 表示声衰减依赖声波频率的程度。

在测量海底沉积物声衰减时, 声波频率从几赫兹到兆赫兹, 方程(4)的指数 r 接近于 1。Hamilton^[23]给出了常数 k 与孔隙度的关系曲线。在 $r=1$ 时, 常数 k 表示声衰减比。

文献[22]的大部分海底沉积物样品的含水量为 62%—76%, 湿密度为 $1.35\text{—}1.61\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 孔隙度为 65%—71%, 沉积物类型为黏土质粉砂、粉砂质砂和砂质粉砂。本文沉积物样品的物理性质(表 1)与它们基本接近。为了分析声衰减规律, 表 5 列出了文献[22]部分北部湾海底浅层沉积物样品声衰减测量结果。

表 4 与表 5 的声衰减数据比较, 声衰减系数随频率增大而变大, 式(4)可以预报。声衰减比随频率增大而变小, 式(4)没有反映这个关系。

表 5 文献[22]中部分海底沉积物样品声衰减测量结果

Tab. 5 Parts of the measured results of [22]

测量频率 /kHz	样品号	$\alpha/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$	$k/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kHz}^{-1})$
	06-3	107.9223	1.0792
	06-4	190.7240	1.9072
	06-1	102.4071	1.0240
	06-13	142.6894	1.4268
	06-3	134.3369	0.1343
	06-4	397.4534	0.3974
	06-1	158.8513	0.1588
	06-13	105.9949	0.1059

注: 测量频率: 为 100kHz; 为 1MHz。

在孔隙度=66%时, 依据 Hamilton 的结果(文献

[23]图 16)得到本文沉积物样品声衰减有关预报值(表 6)。

表 6 式(4)预报本文沉积物样品声衰减结果

Tab. 6 Predicting sound attenuation of samples in this study

	$k_p/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kHz}^{-1})$	$\alpha_p/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$
最大值	0.330	13.2
最小值	0.085	3.4
中值	0.125	15.0

表 4 与表 6 比较, 声衰减系数的测量值与预报值的相对误差(以最大值为例)约为 415%, 表明式(4)用于预报南海沉积物声样品衰减系数的绝对量有较大偏差。

根据 3.1 节的定义, R 是一个常数。为了取出原始的幅值比, 对预报的与测量的声衰减比作指数变换, 即 $k_{tr} = e^k$, 结果见表 7。

通过表 7 可以得到测量值变换结果与预报值变换结果的最大值与最小值的比值, 两个比值的相对误差为 12%, 比预报声衰减系数绝对量的相对误差小得多。表明式(4)用于预报南海沉积物声衰减比的范围是有可能的。

表 7 沉积物声衰减比指数变换结果

Tab. 7 Transformation of ratio of sound attenuation coefficients

	k_{tr-e}	k_{tr-p}
最大值	5.4718	1.3909
最小值	3.7914	1.0887
中值	4.5548	1.1331

注: k_{tr-e} 为测量值变换结果, k_{tr-p} 为预报值变换结果。

4 结论

1) 指数衰减模型是小尺度沉积物的一种声衰减规律, 与声学理论^[14]是一致的。对比分析南海海底沉积物声衰减的历史数据发现, 除指数衰减模型外, 应该还有其他声衰减模型存在, 有待在进一步的工作中验证和创建新的模型。

2) 用声探针测量海底沉积物声波参数的空间间隔小于波长, 测量结果满足声学正演与反演分析的要求。

3) 声探针的探测部分的直径远小于波长, 在测量时对沉积物的声场扰动小, 可在不同方位测量海底沉积物的声波幅值获得其声学特性的分布。

参考文献

- [1] HAMILTON E L. Sound attenuation as a function of depth in the sea floor [J]. *J Acoust Soc Am*, 1976, 59 (3): 528-535.
- [2] LU BO, LI GANXIAN, HUANG SHAOJIAN. Sound velocity of seafloor sediment and its response under axial stress-strain [J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2009, 27 (3): 1-11.
- [3] LU BO, LIANG YUANBO. Statistical correlation of physical parameters with sound velocity in marine sediments of South and East China Seas [J]. *Science in China: B*, 1995, 38 (5): 613-618.
- [4] LU BO, LI GANXIAN. Physical and mechanical characteristics of seabed sediment microstructure in the northern shelf of the South China Sea [J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2003, 21 (1): 1-13.
- [5] LU BO, LI GANXIAN, LIU QIANG, et al. Sea floor sediment and its acouso-physical properties in the southeast open sea area of Hainan Island in China [J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2008, 26 (3): 129-144.
- [6] 刘强, 卢博, 黄韶健, 等. 海底沉积物颗粒因素在不同频率下对声衰减的影响 [J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(4): 27-31.
- [7] 陶春辉. 海底沉积物声学原位测试和特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 5.1-5.2.
- [8] ANDERSON R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[M] //HAMILTON L. *Physics of sound in marine sediments: 1*. New York: Plenum Press, 1974: 481-518.
- [9] GORGAS T J, WILLENS R H, FU S S, et al. In situ acoustic and laboratory ultrasonic sound speed and attenuation measured in heterogeneous soft seabed sediments: Eel River shelf, California [J]. *Marine Geology*, 2001, 182 (1): 103-119.
- [10] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range [J]. *J. Acoust Soc Am*, 1956, 28 (2): 168-178.
- [11] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range [J]. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28 (2): 179-191.
- [12] CHEN M P, SHIEH Y T, CHYAN J M. Acoustic and physical properties of surface sediments in northern Taiwan Strait [J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1998, 21: 92-118.
- [13] 邹大鹏, 卢博, 吴百海, 等. 基于同轴差测量法的南海深水海底沉积物声衰减特性研究[J]. *热带海洋学报*, 2009 (3): 35-39.
- [14] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 75-77.
- [15] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 94-107.
- [16] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 83-84.
- [17] 张海澜. 理论声学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 518-528.
- [18] HAMILTON E L. Compressional-wave attenuation in marine sediments [J]. *Geophysics*, 1972, 37 (4): 620-646.
- [19] BIOT M A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media [J]. *J. Acoust Soc Am*, 1962, 34 (9A): 1254-1264.
- [20] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1990: 26-27.
- [21] 英德比岑. 深海沉积物——物理及工程性质[M]//梁元博, 李粹中, 卢博, 译. 北京: 海洋出版社, 1981: 106.
- [22] 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.
- [23] HAMILTON E L. Prediction of deep-sea sediment properties: State-of-the-art [M]//INDERBITZEN A L. *Deep-sea sediments: physical and mechanical properties*. New York: Plenum Press, 1974: 1-43.