

南黄海中部海底沉积物剪切波速度 测量及其与物理力学性质参数的关系^{*}

阚光明^{1,2}, 张一凡³, 苏远峰^{1,2}, 李官保^{1,2}, 孟祥梅^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局 海洋沉积与环境地质重点实验室,
山东 青岛 266061; 3. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘 要:采用弯曲元剪切波测试方法对在南黄海中部采集到的沉积物样品进行了剪切波速度测试, 基于所获得的剪切波速度数据, 分析了研究区沉积物剪切波速度特性及分布规律。分析表明, 沉积物剪切波速度为 12.05~74.55 m/s, 总体相对较低。浅表层沉积物剪切波速度呈现出分区域分布特征, 可分为东北部低速区、西南部高速区、北西—南东向梯度带以及测区东南部的低速背景上的串珠状高速异常区四个区域。通过回归分析, 建立了剪切波速度与密度、含水率、孔隙比、孔隙度、液限、塑限、压缩系数、抗剪强度等沉积物物理力学参数之间相互关系的经验回归公式。回归分析结果表明, 海底沉积物剪切波速度与上述物理力学参数之间均具有较好的相关性, 相关系数 R 均大于 0.80。

关键词:海底沉积物; 剪切波速度; 弯曲元系统; 经验回归公式; 南黄海

中图分类号: P733.23; P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2014)03-0335-08

沉积物剪切波速度是海底沉积物的声学特性重要参数之一, 剪切波速度的测量和分析在海洋声场预测预报、海底地声模型研究以及海洋工程勘察等方面均具有重要应用^[1-4]。在海洋声学研究方面, 海底浅表层沉积物剪切波传播特性对于海洋水声传播实验结果的解释和声场预报等应用都具有重要意义^[5]。在海底地声模型研究方面, 沉积物剪切波速度是建立完整的海底地声模型不可缺少的特征参数^[6]。在海洋工程应用方面, 沉积物剪切模量和剪切波速度实验室测量被广泛应用于地基承载力、地震导致的砂土液化以及固结行为研究等方面^[7]。因此, 研究海底沉积物剪切波速度空间变化规律以及剪切波速度与沉积物物理性质参数的关系, 对于沉积物剪切波速度及其分布特征的预测预报以及基于剪切波速度对海底沉积物物理和土工性质进行评价等具有重要意义。

海底沉积物声速和声衰减系数等声波传播特性及其与物理力学特性参数的关系已有广泛研究^[8-12]。相比较而言, 海底沉积物剪切波速度测量和研究目前还处于初步阶段。卢博等对我国沿海典型海域的剪切波速度进行了初步分析, 给出了剪切波速度与沉积物密度和液限两个参数的回归关系^[5]。潘国富等对弯曲元法和共振柱法两种剪切波测试方法进行了对比分析, 基于测量数据建立了剪切波速度与沉积物密度、含水率、孔隙度、液限、塑限以及剪切波速度与声速的回归关系^[13], 但研究所涉及的剪切波样品测试数据相对较少。对在我国南黄海中部海域采集到的大量沉积物样品进行了剪切波速度测试。基于这些测试数据, 分析了研究区沉积物剪切波速度特性以及空间分布规律; 通过回归分析, 建立了沉积物剪切波速度与密度、含水率、孔隙比、孔隙度、液限、塑限、压缩系数、抗剪强度等多个物理力学参数之间相互关系的经验回归公式, 研

^{*} 收稿日期: 2013-08-30

资助项目: 国家自然科学基金项目——南黄海中部海底沉积物声学特性及地声模型研究(41106061); 国家海洋局青年基金项目——温度和压力变化对海底沉积物声学特性影响及校正方法(2012318); 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目——南黄海中部海底原位地声模型研究(GY0213G24)

作者简介: 阚光明(1981-), 男, 山东成武人, 博士, 助理研究员, 主要从事海底沉积声学方面研究. E-mail: kgming135@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

究了剪切波速度与这些物理力学参数的相关性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于南黄海中部海域(图 1),水深 15~80 m。研究区沉积环境比较复杂,沉积物物质来源丰富多样,进入黄海中的物质在风、浪、环流和潮流的共同作用下,形成了多种类型的海底沉积物^[14-15]。测区中部和东部底质以粉砂质粘土和粘土质粉砂为主,西南部靠近苏北浅滩,以粉砂、细砂为主,西北部底质主要为粉砂质砂。

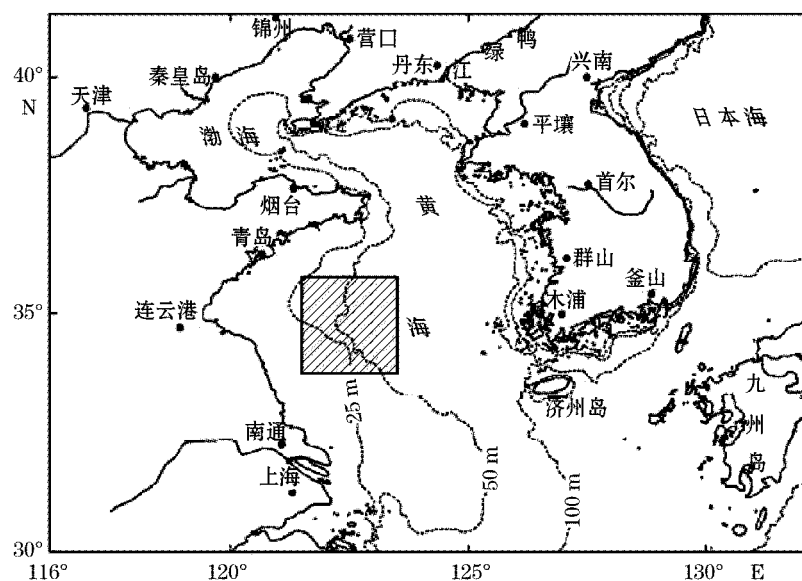


图 1 研究区位置图(图中阴影区)

Fig. 1 Location map of the study area, indicated by shaded square

1.2 材料与方法

2009-06 和 2010-06 在该区域使用重力取样器和箱式取样器开展了海底沉积物取样。2 个航次共完成沉积物取样 303 站位,获得沉积物柱状样品 433.0 m。航次结束后,将样品放入恒温恒湿样品库,然后进行包括剪切波速度在内的声学特性参数以及物理力学性质参数测试。

使用英国 GDS 仪器设备有限公司生产的弯曲元剪切波测试系统对样品进行测试,该系统采用 2 个压电陶瓷弯曲元换能器发射和接收剪切波,进而测量剪切波速度,其测量原理如图 2 所示。每个弯曲元换能器安装有由紧密粘结的 2 片或多片压电陶瓷晶片组成的弯曲元晶片,弯曲元晶片一端固定,另一端可自由振动,形成悬臂结构。当弯曲元晶片通电后,悬臂端产生弯曲变形;反之,当弯曲元晶片受力发生弯曲时,将产生电流,从而发射和接收剪切波信号(图 2a)。在实验室剪切波速度测量时,将弯曲元换能器固定于样品两端,弯曲元晶片的悬臂端被插入沉积物中并确保与沉积物试样良好耦合,一端发射剪切波,另一端接收。根据接收到的剪切波信号的初至时间和测试样品试样长度,采用下列公式计算样品剪切波速度:

$$C_s = L / (T_2 - T_1) \quad (1)$$

式中, C_s 为沉积物样品剪切波速度(m/s); L 为试样上下两端之间的距离(m); T_1 和 T_2 分别为发射剪切波和接收剪切波的初至时间(s)。

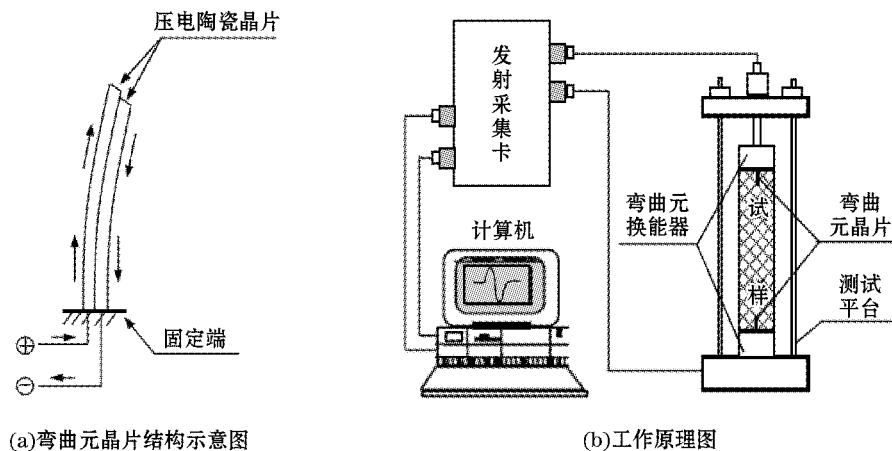


图 2 沉积物剪切波速弯曲元测试系统工作原理示意图

Fig. 2 Sketch of work principle of bender element system used for measurement of shear wave speeds

在进行样品测试时,首先将样品按要求进行截取和分割。将用于剪切波速度测试的样品制备成直径 3.91 cm,高 8 cm 的圆柱试样。将样品放置在专用的测试平台上,将弯曲元换能器分别固定在样品两端,如图 2b 所示。测量时,保证弯曲元换能器与样品良好耦合,且发射换能器的发射晶片与接收换能器的接收晶片同向平行,二者不能交叉垂直。使用千分之一游标卡尺测量样品长度,保证样品长度测量精度不低于 0.1 mm。剪切波声速测量频率一般为 2~5 kHz,含水率较大的淤泥质样品测量频率可设置为 2 kHz,硬度较大的砂质样品设置为 5 kHz。对于截取的每段样品,制备成 3 份测量试样,分别测量每个试样的剪切波速度,然后求取平均值即为该段样品的剪切波速度。截取剩余的其余样品进行了声速和声衰减系数等声学特性测量以及密度、含水率、孔隙度、液限、塑限、压缩系数、抗剪强度、贯入阻力等物理参数力学参数的测试。

采用上述测量技术和方法,采用 2 种频率对研究区沉积物样品的剪切波速度进行了测试,获得了不同沉积物类型和不同深度的沉积物剪切波速度数据。

2 研究区剪切波速度特性及分布规律

2.1 研究区剪切波速度特性

研究区剪切波速度介于 12.05~74.55 m/s,不同类型沉积物的平均剪切波速度见表 1。其中,最小剪切波速度(12.05 m/s)出现在含水率较高的粉砂质粘土沉积物中。波罗的海 Eckernförde 湾的高孔隙度沉积物剪切波速度约为 7.7 m/s^[7],这与本文 12.05 m/s 的最小剪切波速度基本一致。测量得到的最高剪切波速度(74.55 m/s)的沉积物类型为含水率相对较低的粉砂质砂。潘国富等认为近海较细颗粒沉积物粉砂的剪切波速度约为 100 m/s,细颗粒沉积物的剪切波速度在 100 m/s 以下^[13],这与本研究中的最大剪切波速度基本一致。从表 1 所列沉积物粒径数据可知,研究区内沉积物均为颗粒较细的粉砂或粘土质沉积物,剪切波速度相对较低。通过上述的对比可知,我们测量所获得剪切波速度是合理有效的。

表 1 知,粉砂质砂的剪切波速度最高,平均为 31.300 m/s;粉砂质粘土的剪切波速度最低,平均为 21.855 m/s;砂质粉砂、粉砂、粘土质粉砂的剪切波速度平均值处于二者之间,且剪切波速度依次减小,平均值分别为 29.695,28.706 和 25.612 m/s。剪切波速度与密度、含水率、孔隙度等沉积物物理力学性质参数具有很好的相关性,一般随密度增大而增大,随含水率、孔隙度的增大而减小。

表 1 研究区沉积物物理力学性质参数与剪切波速统计表

Table 1 List of physical-mechanical parameters and shear wave speeds from the sediments in the study area

沉积物类型	粉砂质砂	砂质粉砂	粉 砂	粘土质粉砂	粉砂质粘土
剪切波速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	31.300	29.695	28.706	25.612	21.855
中值粒径/mm	0.0674	0.0323	0.0216	0.0184	0.0031
密 度 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.954	1.876	1.825	1.746	1.518
含水率 $w/\%$	34.4	38.5	44.5	57.1	93.5
孔隙度 $n/\%$	45.7	49.5	52.5	57.4	70.8
液 限 $w_L/\%$	25.1	28.6	32.5	39.0	58.6
塑 限 $w_p/\%$	16.6	18.5	20.2	22.0	28.9
塑性指数/ $\%$	8.6	10.1	12.3	17.0	29.7
压缩系数 α_v/MPa^{-1}	0.48	0.67	0.76	1.16	2.13
抗剪强度 S/kPa	6.31	6.94	7.14	6.44	4.49

2.2 研究区剪切波速度平面分布规律

在平面分布上,本区沉积物剪切波速呈现出分区域分布的特征。根据剪切波速度研究区可分为东北部低速区、西南部高速区、北西—南东向梯度带以及测区东南部的低速背景上的串珠状高速异常区等 4 个区域。东北部的低速区剪切波速度为 12.0~20.0 m/s,西南部高速区剪切波速度约为 36.0~70.0 m/s。测区的东南部存在一低速背景上的高速串珠状高速异常,背景剪切波速度约为 18.0~20.0 m/s,局部的高速异常剪切波速度为 40.0 m/s。在低速区和高速区之间存在一北西—南东走向的剪切波速度梯度带,其剪切波速度值约为 20.0~36.0 m/s。测区西南部,在高速背景速度基础上,存在 3 个局部的低剪切波速度异常,剪切波速度约为 30.0~36.0 m/s。

3 研究区剪切波速度与物理力学性质参数的关系

为了分析研究区沉积物剪切波速度与沉积物物理力学参数之间的关系,绘制了密度、含水率、孔隙比、孔隙度、液限、塑限等物理性质参数以及压缩系数、抗剪强度等力学参数与剪切波速度的二维相关图解,如图 3~图 10 所示。对沉积物剪切波速度数据和物理参数分别进行回归分析,将沉积物剪切波速度作为因变量,密度、含水率、孔隙比、孔隙度、液限、塑限、压缩系数、抗剪强度等物理力学参数作为自变量,采用最小二乘法分别得出了沉积物剪切波速度与密度、含水率、孔隙比、孔隙度、液限、塑限的回归公式,建立了剪切波速度单参数预测方程,见表 2。

表 2 剪切波速预测公式

Table 2 Predicting formula of shear wave speeds

相关参数	预测公式	相关系数 R
密 度 ρ	$v_s = 1.8531e^{0.0015\rho}$	0.88
含水率 w	$v_s = 0.0053w^2 - 1.0263w + 66.815$	0.87
孔隙比 e	$v_s = 7.8319e^2 - 38.51e + 64.461$	0.86
孔隙度 n	$v_s = 127.1e^{-0.0274n}$	0.87
液 限 w_L	$v_s = 0.0165w_L^2 - 1.9561w_L + 75.363$	0.87
塑 限 w_p	$v_s = 0.0746w_p^2 - 4.7274w_p + 92.151$	0.82
压缩系数 α_v	$v_s = 1.6823\alpha_v^2 - 13.757\alpha_v + 39.449$	0.80
抗剪强度 S	$v_s = -0.7566S^2 + 6.3374S + 1.8244$	0.81

图 3~图 10 表明,沉积物剪切波速度与密度、含水率、孔隙比、孔隙度、液限、塑限、压缩系数、抗剪强度等物理力学参数之间均具有较好的相关性,相关系数 R 均大于 0.80。从图 3 可以看出,剪切波速度与密度呈正相关关系,随着密度增大,剪切波速度呈指数形式增大,二者相关系数 $R=0.88$ (表 2)。密度是指海底浅表层沉积物在一定单位体积内的颗粒总重与总体积之比,在一定体积内颗粒总重越大表明介质中颗粒所占的重量比例越大,这从另一方面也解释了沉积物密度越大则剪切波速度也越大的现象。

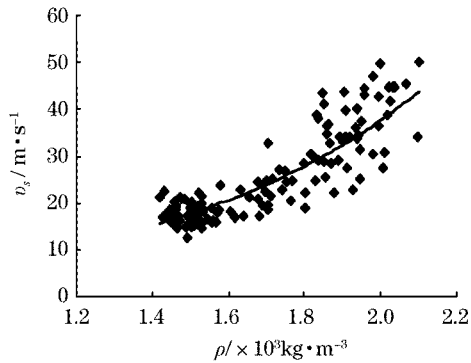


图 3 剪切波速度与密度统计相关图

Fig. 3 Diagrams for the correlation between the shear wave speeds and the density of the sediments

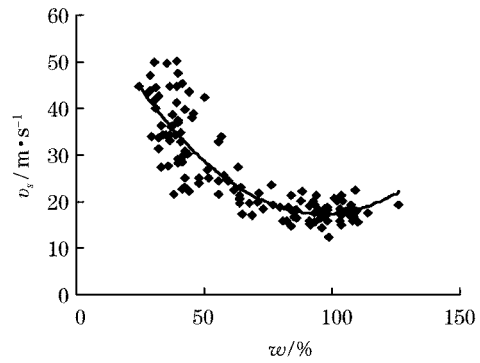


图 4 剪切波速度与含水率统计相关图

Fig. 4 Diagrams for the correlation between the shear wave speeds and the percent moisture of the sediments

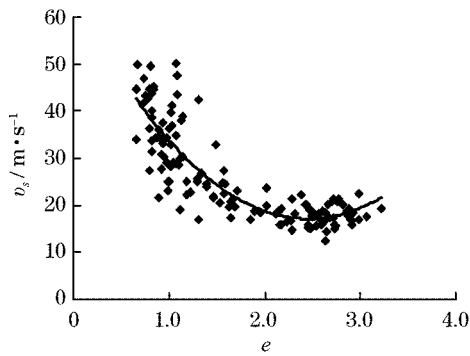


图 5 剪切波速度与孔隙比统计相关图

Fig. 5 Diagrams for the correlation between the shear wave speeds and the porosity ratio of the sediments

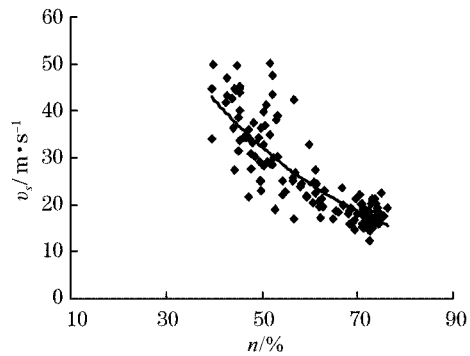


图 6 剪切波速度与孔隙度统计相关图

Fig. 6 Diagrams for the correlation between the shear wave speeds and the percent porosity of the sediments

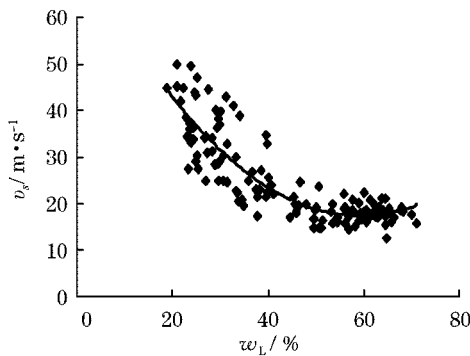


图 7 剪切波速度与液限统计相关图

Fig. 7 Diagrams for the correlation between the shear wave speeds and the liquid limit of the sediments

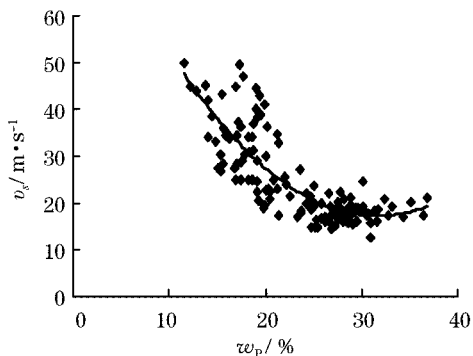


图 8 剪切波速度与塑限统计相关图

Fig. 8 Diagrams for the correlation between the shear wave speeds and the plastic limit of the sediments

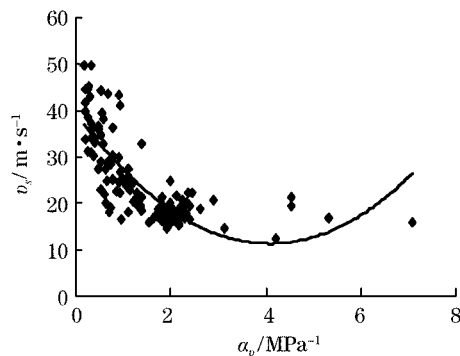


图 9 剪切波速与压缩系数

Fig. 9 Diagrams for the correlation between the shear wave speed and the compression coefficient

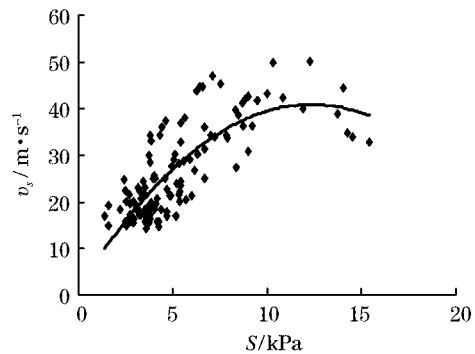


图 10 剪切波速与抗剪强度

Fig. 10 Diagrams for the correlation between the shear wave speed

图 4~图 6 表明,剪切波速度与含水率、孔隙比、孔隙度三参数呈负相关关系,即随着含水率、孔隙比、孔隙度的增大,剪切波速度减小。采用二次多项式对剪切波速度与含水率和孔隙比的相关性进行拟合,二者相关系数分别为 0.87 和 0.86;而剪切波速度与孔隙度则呈现出明显的指数关系,指数拟合的相关系数为 0.87。含水率、孔隙比、孔隙度等参数表述的是沉积物的两相特征,即海底沉积物是由固体骨架和骨架间孔隙中充填的流体组成。含水率高、孔隙度大的沉积物表现出更大的流体性质,而低含水率、低孔隙度的沉积物则表现出更多的弹性性质。因此,在低含水率、低孔隙度的沉积物中,剪切波速度一般较高。相关测试数据表明,同为粒度大小基本相同的粘土,近岸低含水率、低孔隙度的硬粘土的剪切波速度可超过 200 m/s,而近海高含水率、高孔隙度的粘土的剪切波速度却非常低,常小于 50 m/s,甚至小于 20 m/s。这与本研究中剪切波速度的测试结果以及剪切波速度与含水率、孔隙比和孔隙度的关系相一致。

由图 7、图 8 可知,剪切波速度与沉积物液限、塑限呈负相关关系,随着液、塑限的增大,沉积物剪切波速度呈明显的减小趋势。剪切波速度与沉积物液限和塑限之间的相关性可采用二次多项式进行很好拟合,二者相关系数分别为 0.87 和 0.82。沉积物液限和塑限值高在一定程度上表明粘粒含量高,颗粒细,孔隙多,因而剪切波速度小。

由图 9、图 10 可知,剪切波速度与沉积物压缩系数呈负相关关系,而与抗剪强度呈正相关关系。剪切波速度与沉积物压缩系数和抗剪强度之间的相关性可采用二次多项式进行很好拟合,二者相关系数分别为 0.80 和 0.81。压缩系数指的是单位压力变化时引起的介质单位体积的变化,其倒数为体积模量,反映沉积物的可压缩性。沉积物压缩波速一般与体积模量呈正相关,与压缩系数呈负相关,而沉积物剪切波速度与压缩波速度一般呈线性正相关。这也从另一方面解释了剪切波速度与沉积物压缩系数的负相关关系。抗剪强度是沉积物主要的力学特性参数之一,指的是沉积物抵抗剪切破坏的极限能力。沉积物抗剪强度反映了沉积物承载剪切应力的能力,抗剪强度大说明承载剪切应力能力强,也就越利于剪切波的传播。反之,如果沉积物的抗剪强度非常小,则说明其不支持剪切波传播,即剪切波速度非常小或为零。图 10 所示的统计相关性图解以及表 1 中给出的剪切波速度与抗剪强度关系的经验回归公式也说明了剪切波速度与抗剪强度的这种正相关关系。

4 结 语

对南黄海海底沉积物剪切波速度实测数据的分析表明,研究区剪切波速度可分为东北部低速区、西南部高速区、北西—南东向梯度带以及测区东南部的低速背景上的串珠状高速异常区四个区域。沉积物剪切波速与密度、含水率、孔隙比、孔隙度、液限、塑限、压缩系数、抗剪强度等物理力学参数具有良好的相关性,建立

的剪切波速度预测方程可以用于研究区综合地声模型的研究以及研究区工程地质参数的反演和评价。

参考文献(References):

- [1] WEN M M, XIAO B, CUI H Y. The method for measuring the acoustics characteristic of the ocean sediment[J]. Ocean Technology, 2006, 25(1): 124-126. 温明明, 肖波, 崔华义. 海底沉积层声学特性测量方法研究[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 124-126.
- [2] WANG Q, LIU Y C, BAO J Y, et al. The methods and comparison of measuring the sediment's sound velocity in sea floor[J]. Ocean Technology, 2006, 25(3): 100-102. 王琪, 刘雁春, 暴景阳, 等. 海底沉积物声速测量方法及其比较[J]. 海洋技术, 2006, 25(3): 100-102.
- [3] LU B. Primary study on physical properties of surface sediments in the area of the Nansha Islands[J]. Science in China; Series D, 1997, 27(1): 77-81. 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.
- [4] SONG L. Study on measurement method of ocean bottom scattering coefficient[D]. Haerbin: Haerbin Engineering University, 2007. 宋磊. 海底散射系数测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [5] LU B, LI G X, HUANG S J, et al. A preliminary study of shear wave in seafloor surface sediments[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(4): 11-18. 卢博, 李赶先, 黄韶健, 等. 海底浅层介质切变波的初步研究[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4): 11-18.
- [6] BUCKINGHAM M J. Compressional and shear wave properties of marine sediments: Comparisons between theory and data[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2005, 117(1): 137-152.
- [7] JACKSON D R, RICHARDSON M D. High-Frequency seafloor acoustics[M]. New York: Springer Press, 2007: 152-156.
- [8] LU B, LIANG Y B. The correlation between sound speeds and physical properties of east-southern coastal seafloor sediments[J]. Science in China; Series B, 1994, 24(5): 556-560. 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: B 辑, 1994, 24(5): 556-560.
- [9] TANG Y L. The seafloor sediment physical and acoustic properties in the three area of the South China Sea[J]. Ocean Technology, 1991, 10(1): 81-91. 唐永禄. 南海三海区海底沉积物物理性质及声学特性[J]. 海洋技术, 1991, 10(1): 81-91.
- [10] ZHOU J P, TAO C H, HE Y H, et al. Application of nondestructive ultrasonic testing technology in the marine sediment research[J]. Ocean Technology, 2007, 26(4): 40-43. 周建平, 陶春辉, 何拥华, 等. 超声无损检测技术在海底沉积物调查中的应用[J]. 海洋技术, 2007, 26(4): 40-43.
- [11] ZOU D P, LU B, WU B H, et al. Acoustic attenuation characteristics of deep-water seafloor sediments from the South China Sea based on coaxial differential distance attenuation measurement method[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(3): 35-39. 邹大鹏, 卢博, 吴百海, 等. 基于同轴差量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, 28(3): 35-39.
- [12] CHENG J J, FU M Z, MENG X M, 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, 41(Sup.): 331-336. 程净净, 付命佐, 孟祥梅, 等. 南黄海中部沉积物物理力学性质及声学特性分析[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(增): 331-336.
- [13] PAN G F, YE Y C, LAI X H, et al. Shear wave velocity of seabed sediment from laboratory measurements and its relationship with physical properties of sediment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(5): 64-68. 潘国富, 叶银灿, 来向华, 等. 海底沉积物实验室剪切波速度及其与沉积物的物理性质之间的关系[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 64-68.
- [14] LAN X H, ZHANG X H, ZHANG Z X. Material sources and transportation of sediments in the Southern Yellow Sea[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2005, (4): 53-60. 蓝先洪, 张训华, 张志珣. 南黄海沉积物的物质来源及运移研究[J]. 海洋湖沼通报, 2005, (4): 53-60.
- [15] ZHANG X J, LAN X H, ZHAO G T, et al. Analysis of characteristics of surface seafloor sediment particles in the Middle-western Yellow Sea[J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(7): 8-13. 张宪军, 蓝先洪, 赵广涛, 等. 南黄海中西部表层沉积物粒度特征分析[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(7): 8-13.

Shear Wave Speeds Measured for Sediments From the Middle of the Southern Yellow Sea and Their Correlations With Physical-mechanical Parameters

KAN Guang-ming^{1,2}, ZHANG Yi-fan³, SU Yuan-feng^{1,2}, LI Guan-bao^{1,2}, MENG Xiang-mei^{1,2}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology of SOA,*

Qingdao 266061, China; 3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266061, China)

Abstract: The shear wave speeds of core samples collected from the middle of the Southern Yellow Sea are measured using bender elements method, and then the properties of shear wave speeds and its spatial distribution are analyzed based on the measured data of shear wave speeds. It is demonstrated that the shear wave speeds of the study area are relatively low, ranging from 12.05 m/s to 74.55 m/s. The zonal distribution of shear wave speeds are divided into four sub-zones: low speed sub-zone in the northeast; high speed sub-zone in the southwest; speed gradient band aligning from northwest to southeast; and high-speed beaded anomaly in the low speed background in the southeast. The empirical equations with good coefficients ($R > 0.80$) between shear wave speeds and physical-mechanical parameters, such as density, percent moisture, porosity ratio, percent porosity, liquid limit, plastic limit, compression coefficient, shear strength of seafloor sediments, were built up by means of regression analysis.

Key words: seafloor sediment; shear wave speed; bender elements system; empirical equation; Southern Yellow Sea

Received: August 30, 2013