

李赶先,龙建军,马雯波. 含砂量变化影响海底沉积物压缩波速度的分析研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(5): 70-78, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.05.007

Li Ganxian, Long Jianjun, Ma Wenbo. Influence of sand concentration variation on the compressed waves velocity in the seabed sediments[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 70-78, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.05.007

# 含砂量变化影响海底沉积物 压缩波速度的分析研究

李赶先<sup>1</sup>,龙建军<sup>2</sup>,马雯波<sup>3</sup>

(1.中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室(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;3.湘潭大学 土木工程与力学学院,湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 本文通过对南海海底沉积物样品的声学物理参数和沉积粒度特征统计分析,发现了高、低含砂量沉积物的声学物理特征存在明显差异,建立了海底沉积物的含砂量与压缩波速度、孔隙度、含水量和密度等经验公式,分析了含砂量变化与沉积物的体积压缩模量和密度变化的关系,从声速理论上阐明了含砂量变化引起沉积物压缩波速度变化的内在原因是含砂量变化引起了体积压缩模量和密度发生了变化,说明了含砂量增大引起沉积物压缩波速度增大的内在原因是含砂量增大引起了体积压缩模量变化量大于密度变化量,从而在数据统计和理论分析结合基础上,论证了含砂量是影响海底沉积物压缩波速度的重要因素之一。这一研究对声学方法反演海底沉积物粒度参数和沉积物类型、地声参数转换模型的建立,以及对水声反演海底和海底资源勘探等方面都具有重要理论意义和应用价值。

**关键词:** 海底沉积物;压缩波速度;含砂量;体积压缩模量;孔隙度

中图分类号:P733.23

文献标志码:A

文章编号:0253-4193(2019)05-0070-09

## 1 引言

在进行海底沉积物声学特性参数测量过程中,经常遇到手感粗糙、砂质感明显的沉积物声速较高,同时其十字板剪力仪和贯入仪的读数也较高。这反映出海底沉积物的含砂量与其声速和抗剪强度等声学物理及工程性质存在一定相关性。由于含砂量是海底沉积物的重要特征量之一,也是海底沉积物粒度分类命名的基本参数<sup>[1]</sup>,所以,研究含砂量与海底沉积物声学物理等参数关系,以及探讨含砂量影响海底沉积物声速的理论原因,对于深入了解海洋水声传播与

海底地声环境的响应机制、建立海底地声模型和提高海底声学反演精度等方面<sup>[2-6]</sup>是十分必要的。

本文在对南海海底沉积物样品进行各项参数测量基础上,分析了高、低含砂量海底沉积物的声学物理参数特性差异,研究了含砂量与海底沉积物的压缩波速度及其相关参数的关系,探讨了海底沉积物含砂量变化引起声速变化的内在原因,获得了一些具有理论价值和应用意义的创新性结果。

## 2 数据来源

近30年来,我们对包括南海陆架、陆坡、深海盆

收稿日期:2018-05-30;修订日期:2018-09-23。

基金项目:国家自然科学基金(41476028);湖南省重点研发计划项目(2017WK2032);声场声信息国家重点实验室开放课题研究基金(SKLA201606)。

作者简介:李赶先(1963—),男,山东省潍坊市人,副研究员,从事海底沉积声学研究。E-mail:djtlgx@163.com

地和岛礁陆架等在南海海底进行了广泛的底质声学调查,利用海底沉积物重力取样器和箱式取样器,获得了大量的南海底质柱状样(长度一般为1.0~3.5 m)和表层样(0~0.4 m),对大多数样品进行了粒度分析,并进行了压缩波速度、密度和孔隙度等声学物理参数测试。

在南海北部近岸海底的现代陆源砂、南海北部外陆架浅海及外缘的(古滨海)残留砂(水深20~400 m)以及南海岛礁陆架海底的珊瑚砂,是南海底质砂粒级沉积物分布的主要区域。南海北部陆架的韩江口外海底沉积物含砂量高达79%~89%,南海中央海盆(水深大于3 500 m)海底沉积物的含砂量一般在10%以下<sup>[7-9]</sup>。一般讲来,南海海底沉积物普遍含砂,而且具有海底沉积物含砂量离陆(或岛)减少的分布特征,由此反映出大陆和岛礁是南海海底沉积物砂粒级组分的主要物源。

砂质沉积物在南海海底的广泛分布,以及底质采样测量获得的大量海底沉积物颗粒度参数和声学物理参数数据,为本文的含砂量影响海底沉积物压缩波

速度的分析研究提供了数据基础。

### 3 数据统计分析结果

海底沉积物中的含砂量是指直径介于0.063~2 mm之间颗粒重量的百分含量,直径小于0.063 mm的颗粒属于粉砂或黏土,而直径大于2 mm的颗粒属于砾。根据国家标准GB/T12763.8-2007《海洋调查规范第8部分海洋地质地球物理调查》<sup>[1]</sup>的海底沉积物颗粒命名原则,当含砂量大于75%时,可直接称为砂;当含砂量介于50%~75%时,以砂为基本名,次要颗粒含量为修饰名;当砂含量介于10%~50%时,砂作为颗粒名称的修饰语;而当砂含量小于10%时,砂就不参加沉积物的颗粒命名。由此可见,从海底沉积物的颗粒名称,可以直接知道其含砂量的区间范围,这使得含砂量是有关海底沉积物的名称分类、底质分布和声学物理等方面的重要特征量。

表1为南海海底60个站位样品的高(>50%)、低(<1%)含砂量沉积物压缩波速度及相关参数数据。

表1 南海海底的高、低含砂量沉积物压缩波速度及相关参数数据

Tab.1 Compression wave velocity and related parameters of sediments with high and low sand contents in the South China Sea

含砂量/%	数据分类	压缩波速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	含水量/%	孔隙度/%	中值粒径/mm	抗压强度/kPa	切变模量/ $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$	体积压缩模量/ $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
>50%	最大值	1 666	1.94	46.3	55.7	0.160 1	23.3	0.04	3.99
	最小值	1 553	1.74	30.3	44.6	0.082 3	2.4	0.02	2.91
	平均值	1 604	1.86	35.6	48.3	0.112 0	12.2	0.03	3.54
<1%	最大值	1 481	1.59	122.3	77.1	0.010 6	13.6	0.03	2.76
	最小值	1 461	1.36	78.2	67.4	0.006 1	0.6	0.01	1.2
	平均值	1 473	1.45	105.7	73.3	0.007 1	3.9	0.02	2.3

从表1可以看出,相对于含砂量小于1%的沉积物来讲,含砂量大于50%的高含砂量沉积物具有较高的声速、密度和中值粒径,以及具有较高的体积压缩模量、切变模量和抗压强度,而其含水量和孔隙度明显偏低。

图1为南海海底60个站位样品的沉积物含砂量百分比区间的压缩波速度、密度、孔隙度和含水量平均值变化图,从该图可以看出,随着海底沉积物含砂量增大,其压缩波速度和密度趋向增高,而孔隙度和含水量趋向降低。

由表1和图1可以看出,海底沉积物含砂量与压

缩波速度及其相关参数(孔隙度、密度和含水量等)存在相关变化,这反映出含砂量是影响海底沉积物压缩波速度的一个重要因素。

对海底沉积物压缩波速度与物理力学参数关系的研究,一直是海底沉积声学研究的重要内容。Anderson<sup>[10]</sup>用地声取样管在西北太平洋和大西洋海域进行了海底浅层介质压缩波传播现场测量和同步底质取样。Hamilton和Bachman<sup>[11]</sup>对西北太平洋和大西洋海域海底浅层介质压缩波传播特征问题进行了长期研究,提出了Hamilton海底地声模型。梁元博和卢博<sup>[12]</sup>在南海、东海海域进行了海底浅层介质取

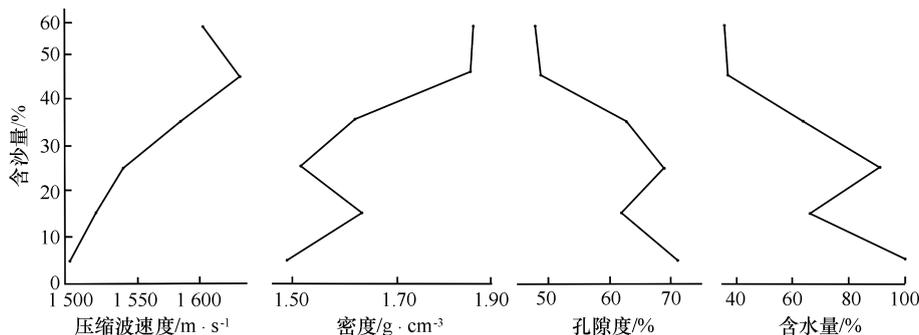


图1 海底沉积物含砂量与压缩波速度、密度、孔隙度和含水量相关变化

Fig.1 Variations of sand content in seabed sediments in relation to compression wave velocity, density, porosity and water content

样和实验室样品压缩波测量,提出以压缩波速度为依据判别沉积物性质的方法。Chen等<sup>[13]</sup>在台湾海峡西北部浅海进行了海底浅层介质取样和实验室样品压缩波测量;钱正明<sup>[14]</sup>在台湾以东海域进行了类似的研究。Fu和Wilkens<sup>[15]</sup>报道了用声学探针得到的沉积物剖面结果。邹大鹏等<sup>[16]</sup>对中国东南沿海沉积物压缩波速度与物理参数进行了相关分析。这些研究得出很多有意义的成果,建立了一些较好拟合程度的预估沉积物压缩波速度经验公式,如:

Hamilton公式:

$$C = 2455.9 - 21.716n + 0.126n^2. \quad (1)$$

Anderson公式:

$$C = 2566 - 27.58n + 0.188n^2. \quad (2)$$

梁元博公式:

$$C = 4195 - 90.5833n + 0.7695n^2 - 94.9668qu + 64.4603qu^2. \quad (3)$$

Chen Min-Pen公式:

$$C = 2860.449 - 721.958M_d + 147.548M_d^2 - 10.157M_d^3. \quad (4)$$

卢博公式:

$$C = 2470.7 - 32.2n + 0.25n^2 \text{ (中国沿海)}, \quad (5)$$

$$C = 1809.7 - 11.17\omega + 0.08\omega^2 \text{ (中国沿海)}. \quad (6)$$

上述公式中, $C$ 为压缩波速度(单位:m/s), $n$ 为孔隙度(%), $\omega$ 为含水量(%), $M_d$ 为中值粒径( $\Phi$ ), $qu$ 为抗压强度(单位:kg/cm<sup>2</sup>).

前人研究得出了大体一致的结论,即:影响海底沉积物压缩波速度的首要因素是孔隙度,孔隙度增大则声速减小,而孔隙度减小则声速增大<sup>[10-16]</sup>。海底沉积物的孔隙度与压缩波速度有着良好相关性。孔隙度是沉积物中孔隙体积(主要为海水所充填)与沉

积物总体积之比。孔隙度的大、小与孔隙结构以及构成孔隙结构的颗粒大小差异有关。海底水饱和和地层的孔隙度可以用于求解海底地层的体积压缩模量进而求压缩波速度,以及用于识别水合物和估计水合物储量等<sup>[17]</sup>。孔隙度较大的海底沉积物,含水量较大。孔隙度、含水量愈大,压缩波速度愈小,反之亦然。由于海底沉积物中的海水声速比固体颗粒声速低,所以,孔隙度和含水量较大的海底沉积物声速较低是容易理解的。

由上可见,前人研究海底沉积物的压缩波速度影响因素主要是孔隙度、含水量和中值粒径等参数,而对于含砂量与海底沉积物压缩波速度及其相关参数的关系,以及对于含砂量影响沉积物压缩波速度的理论机制,研究尚少<sup>[18-19]</sup>。由于大量实测数据表明,含砂量变化影响海底沉积物压缩波速度变化,含砂量是影响海底沉积物压缩波速度的一个重要因素,特别是由于海底沉积物的含砂量参数具有指示沉积物海陆相变的地质意义,以及具有声学方法反演海底沉积物粒度类型分布的应用意义,使得含砂量影响海底沉积物压缩波速度的研究具有理论意义和实用价值。这正是本文深入研究含砂量与海底沉积物压缩波速度响应机制的重要原因。

对南海海底58个站位样品的海底沉积物含砂量 $S$ 与压缩波速度 $C$ 数据进行统计分析,得到经验公式为:

$$C = 1480.16 + 3.3393S - 0.0176S^2, r = 0.8276. \quad (7)$$

这表明海底沉积物的压缩波速度与含砂量存在正相关,当含砂量较高时,海底沉积物的压缩波速度较大。

对南海海底 58 个站位样品的沉积物含砂量  $S$  与孔隙度  $n$  参数数据进行统计分析,得到经验公式为:

$$n = 72.0782 - 0.2911S - 0.0021S^2, \\ r = -0.7666. \quad (8)$$

这表明海底沉积物的孔隙度与含砂量存在负相关,当含砂量较高时,海底沉积物的孔隙度较小。

由数据统计分析得出的含砂量与海底沉积物压缩波速度和孔隙度的相关变化(图 2)。

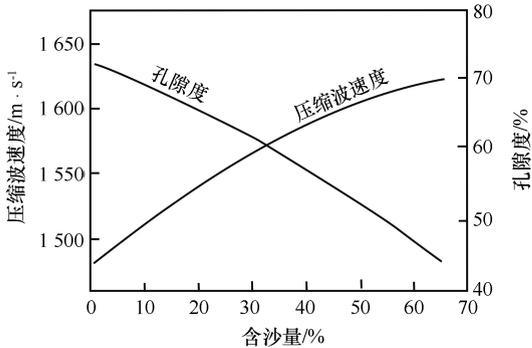


图 2 含砂量与海底沉积物压缩波速度和孔隙度的相关变化

Fig.2 Correlation of sand content to compression wave velocity and porosity of seabed sediments

由图 2 看出,随着海底沉积物的含砂量增大,孔隙度减小而压缩波速度趋向增大。这反映出海底沉积物含砂量增大引起压缩波速度增大,与孔隙度减小引起压缩波速度增大是相应一致的。这基本说明了,主要由固液两相组分构成的海底沉积物中的固体颗粒因素(以含砂量和中值粒径代表)影响增强引起压缩波速度增高,液相海水因素(以孔隙度和含水量代表)影响增强引起压缩波速度降低,以及这两类影响海底沉积物压缩波速度的基本因素因处于同一事物内部而存在对立统一和相互制约特征。

随着海底沉积物含砂量增大,压缩波速度趋向增大而孔隙度趋向减小。这反映出含砂量增大与孔隙度减小对海底沉积物的压缩波速度存在相同的影响效应,而这个相同影响效应的本质内涵及其与压缩波速度的响应机制,正是本文要深入探讨的理论问题。

含砂量作为表述海底沉积物颗粒大小和粒级含量的特征参数,不但与影响海底沉积物压缩波速度的孔隙度相关,而且与影响压缩波速度的其他参数,如含水量和密度等物理参数相关。

对南海海底 58 个站位沉积物样品的含砂量  $S$  与含水量  $\omega$  参数数据统计分析,得到的经验公式为:

$$\omega = 102.2823 - 1.2389S + 0.0014S^2, \\ r = -0.6616. \quad (9)$$

这表明海底沉积物的含砂量与含水量负相关,当含砂量增大时,含水量较低。

对南海海底 58 个站位样品的沉积物含砂量(%)与密度  $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )参数数据统计分析,得到的经验公式为:

$$\rho = 1.3615 + 0.0055S - 1.9041 \times 10^{-6}S^2, \\ r = 0.8752. \quad (10)$$

这表明海底沉积物的含砂量与密度正相关,当含砂量增大时,密度较高。

由数据统计分析得出的沉积物含砂量与含水量、密度相关变化(图 3)。

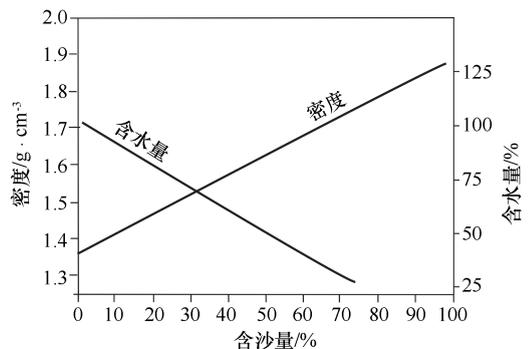


图 3 海底沉积物含砂量与含水量、密度的相关变化  
Fig.3 Correlation of sand content to water content and density in seabed sediments

由图 3 看出,随着海底沉积物的含砂量增大,含水量趋向减小而密度趋向增大。这显示出含砂量变化对影响沉积物压缩波速度的其他因素,包括含水量和密度等参数存在影响。

含砂量与沉积物压缩波速度及其相关参数,包括孔隙度、含水量和密度等存在相关变化,这反映出含砂量变化引起沉积物的模量和密度变化,从而影响了沉积物压缩波速度变化。因为,从声速理论公式来讲<sup>[20]</sup>,模量和密度是影响沉积物声速的不可或缺的两个基本因素,任何沉积物的颗粒度参数和物理力学参数影响声速变化的内在原因,都是因为影响到沉积物的模量和密度变化而影响了声速。那么,含砂量变化是如何影响沉积物的模量和密度变化而影响声速变化呢,这是一个需要深入探讨的问题。

## 4 讨论

虽然许多研究者认为孔隙度是影响海底沉积物

压缩波速度的主要因素<sup>[21-23]</sup>,但也有学者看到了颗粒度参数等固体颗粒因素对沉积物压缩波速度的影响。汪德昭和尚尔昌<sup>[24]</sup>认为,海底沉积物不论是湿样品还是干样品,其颗粒大小都不会改变,所以,用颗粒参数来预报沉积物压缩波速度更为可靠。卢博等<sup>[25]</sup>认为,颗粒度参数是沉积物中较为稳定的参数,它们深刻地影响到海底沉积物的物理力学性质和声学特质。海底沉积物颗粒对声波传播产生一系列的散射、吸收以及驰豫效应等作用,若沉积物存在粒度分层结构,还引起声反射作用与声衰减效应等。海底沉积物的声传播,会使其中颗粒产生散射波和黏滞波,这些波传到其他颗粒周围又会产生二次散射波和二次黏滞波,依次继续下去,直到遭到介质衰减而终止<sup>[25]</sup>。所以,海底沉积物的压缩波速度及其衰减等声学特性与固体颗粒特性密切相关,因而与表述颗粒大小和粒级配比的含砂量存在相关。

一般来讲,海底沉积物主要是由海水和固体颗粒组成的,影响其压缩波速度的主要因素必然归属于这两大组分。由于海底沉积物的孔隙充填有海水,所以,孔隙度和含水量本质上代表着影响海底沉积物压缩波速度的液相因素;另一方面,以含砂量、平均粒径等代表的颗粒度参数是影响海底沉积物压缩波速度的固相因素。Biot<sup>[26-27]</sup>提出的松散饱和水沉积物声波传播理论说明,海底沉积物声速影响因素本质分为固体颗粒和海水流体两个方面。在不同频率情况下,海底沉积物的孔隙流体黏滞耗散与骨架耗散对声波速度的影响存在显著差异<sup>[28]</sup>,由此显示出固体颗粒因素、液相海水因素对沉积物压缩波速度存在着不同的影响作用。所以,海底沉积物压缩波速度除了受到孔隙度和含水量等液相因素影响之外,也受到固体颗粒因素的影响。

相对于平均粒径和中值粒径等代表颗粒特征平均情况来讲,含砂量与沉积物整体骨架体积压缩系数、固体颗粒压缩系数和体积压缩模量等影响压缩波速度的固体颗粒因素密切相关,而且含砂量是海底沉积物粒度分类和定名的重要特征量,具有更为广泛的沉积动力学和海底地形地貌内涵。所以,对海底沉积物含砂量与压缩波速度响应机制的探讨,有利于对海洋水声传播的海底制约机制和海底地声模型的深入研究。

陆源性海底沉积物具有环陆分布和离陆变细的特征,这主要因为陆源物质向海洋搬运过程中,较粗颗粒搬运距离较近,而较细颗粒搬运距离较远造成

的。一般讲来,海洋的生物、化学或火山灰等沉积物颗粒较细,多为黏土质粉砂或粉砂质黏土<sup>[29]</sup>,所以,海底沉积物中较粗的砂颗粒主要来源于陆源物质,也就是说,海底沉积物的含砂量越高,其陆源砂颗粒就越多。

研究表明,陆源石英颗粒是海底沉积物中砂颗粒的主要矿物成分,石英砂颗粒在南海海底沉积物中分布广泛,含量较高,一般占砂质沉积物重量的60%~80%,而且沉积物的砂含量越高,其石英含量越高<sup>[12,30]</sup>。

测量表明,作为海底沉积物的砂颗粒主要成分的石英矿物声速值为5 639 m/s,这远高于一般海底沉积物的声速值<sup>[25]</sup>;Hamilton<sup>[31]</sup>研究表明,全球海洋大陆架与大陆坡的沉积物压缩波速度:粗砂为1 836 m/s、细砂为1 753 m/s、粉砂为1 623 m/s、粉砂质黏土为1 520 m/s;深海平原和深海丘陵沉积物压缩波速度:砂质粉砂为1 622 m/s、粉砂为1 563 m/s、黏土为1 504 m/s。由此可见,海底沉积物中的颗粒越粗,砂含量越高,高声速的石英颗粒和较粗颗粒等固体颗粒含量越大,沉积物声速就越高。

从声学理论上讲<sup>[20]</sup>,当声波幅度较小时,平面波的波速公式为:

$$C = (M/\rho)^{1/2}, \quad (11)$$

式中, $M$ 、 $\rho$ 为介质的模量和密度。对于饱和海水的海底沉积物来讲,当 $M$ 为沉积物体积压缩模量时, $C$ 为沉积物压缩波速度。

由此可见,影响海底沉积物压缩波速度的基本因素有两个,一个是体积压缩模量,另一个是沉积物密度。如果从体积压缩模量对压缩波速度的影响来看,沉积物压缩波速度随着体积压缩模量的增大而增大。

图4为南海海底58个站位沉积物参数数据统计分析得出的含砂量与体积压缩模量、压缩波速度关系对比。由图4看出,随着含砂量增大,海底沉积物的体积压缩模量增大,压缩波速度也增大。

从声速理论公式(11)可以看出,除了体积压缩模量影响海底沉积物压缩波速度之外,另一个影响沉积物声速的因素是密度。由于含砂量变化会引起海底沉积物的体积压缩模量和密度同时发生变化。所以,在分析含砂量影响沉积物压缩波速度变化的物理机制时,需要分析体积压缩模量变化量与密度变化量的相对大小。

以含砂量为0的海底沉积物为初始状态,沉积物的压缩波速度为:

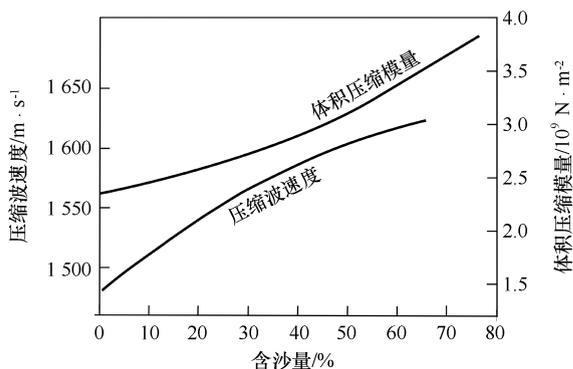


图4 海底沉积物含砂量与体积压缩模量、压缩波速度关系对比

Fig.4 Contrast of sand content in seabed sediments with volume compression modulus and compression wave velocity

$$C_0 = (M_0/\rho_0)^{1/2}, \quad (12)$$

式中,  $M_0$ 、 $\rho_0$  是含砂量为 0 的海底沉积物的模量和密度。

依据上述统计分析结果,随着含砂量增大,海底沉积物的体积压缩模量和密度都增大。对于某一含砂量  $t$ (%) 的海底沉积物来讲,其压缩波速度公式为:

$$C_t = (M_t/\rho_t)^{1/2}, \quad (13)$$

式中,  $M_t$  和  $\rho_t$  是含砂量为  $t$ (%) ( $t$  在 0 至 100 内取值) 的海底沉积物的模量和密度。对式(12)和式(13)推导可得:

$$C_t = C_0 (1 + \Delta M/M_0)^{1/2} (1 + \Delta\rho/\rho_0)^{-1/2}, \quad (14)$$

式中,  $\Delta M/M_0$  和  $\Delta\rho/\rho_0$  分别称为模量(对于压缩波速度来讲对应着体积压缩模量)变化比和密度变化比。模量变化量  $\Delta M = M_t - M_0$ , 密度变化量  $\Delta\rho = \rho_t - \rho_0$ 。

比较模量变化比和密度变化比的变化趋势,可以发现:当  $1 + \Delta M/M_0 > 1 + \Delta\rho/\rho_0$ , 即  $\Delta M/M_0 > \Delta\rho/\rho_0$  时,声速  $C_t$  增加。

利用样品实测数据对 58 个站位海底沉积物的含砂量  $S$ (%) 与影响压缩波速度的体积压缩模量变化比  $\Delta M/M_0$ 、密度变化比  $\Delta\rho/\rho_0$  进行数据回归分析得到如下经验公式:

$$\begin{aligned} \Delta M/M_0 &= 0.06162 + 0.0063S + 9.2452 \times 10^6 S^2, \\ r &= 0.89850407. \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta\rho/\rho_0 &= 0.04639 + 0.00327S + 5.9363 \times 10^6 S^2, \\ r &= 0.8750471. \end{aligned} \quad (16)$$

由上可见,海底沉积物的体积压缩模量变化比  $\Delta M/M_0$  随含砂量增大而增大,另外,密度变化比  $\Delta\rho/\rho_0$  也随着含砂量的增大而增大。

图 5 为上述数据统计得到的海底沉积物含砂量  $S$ (%) 与体积压缩模量变化比  $\Delta M/M_0$  和密度变化比  $\Delta\rho/\rho_0$  关系对比。

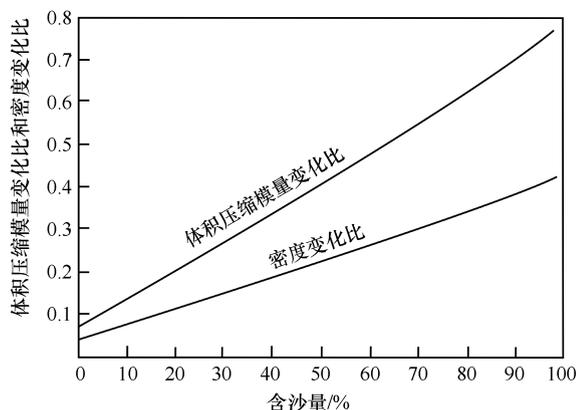


图5 海底沉积物含砂量与体积压缩模量变化比和密度变化比关系对比

Fig.5 Comparison of variation ratio of sand content to bulk modulus of compression and density in seabed sediments

由图 5 看出,相对于含砂量为 0 的海底沉积物来讲,含砂量增大引起沉积物的体积压缩模量变化比增大,密度变化比也增大,而且,在含砂量一定的情况下,海底沉积物的体积压缩模量变化比的值大于密度变化比的值,即,  $\Delta M/M_0 > \Delta\rho/\rho_0$ , 这满足了从声速理论公式推导得出的海底沉积物压缩波速度增大的理论条件,所以,含砂量增大引起海底沉积物压缩波速度增大的内在原因是含砂量增大引起体积压缩模量变化比大于密度变化比造成的。

从上述数据统计和理论分析可以看出,海底沉积物含砂量增大相关的密度增大,本质对应着沉积物的体积压缩模量变化比大于密度变化比,从而对应着沉积物压缩波速度的增大;而海底沉积物含砂量减小相关的孔隙度增大和含水量增大,本质对应着沉积物的体积压缩模量变化比小于密度变化比,从而对应着沉积物压缩波速度的减小。所以,前人众多研究得出的大体一致结论,即:孔隙度增大则压缩波速度减小,本质对应着孔隙度增大相关的含砂量减小引起了沉积物的体积压缩模量变化比小于密度变化比。这就从声速理论公式上解释了前人数据统计得到的声速—孔隙度等经验公式成立的理论基础,从而找到了孔隙度和含水量等因素影响沉积物压缩波速度变化的响应机制与本质内涵。

含砂量与孔隙度作为影响海底沉积物压缩波速度的固相组分与液相组分因素的代表性参数,本质上

都是通过引起沉积物的模量和密度变化而导致压缩波速度变化,所以,含砂量与孔隙度都是影响海底沉积物声速的重要因素,二者在陆架、陆坡和深海盆地等不同粒度类型沉积物的声速影响效应上存在差异,因而有必要研究各类海底沉积物的声速与相关因素响应机制,以便清楚了解各种地声环境的声学效应,建立精确的海底多参数地声模型,进而为海洋水声传播、海底资源勘探和海底工程建设等方面提供理论支持与技术应用。

## 5 结论

本文通过对南海海底沉积物含砂量与压缩波速度及相关参数的数据统计和理论分析,得到如下几点认识:

(1)含砂量是影响海底沉积物压缩波速度变化的一个重要因素。相对于低含砂量沉积物来讲,高含砂量沉积物具有较高压缩波速度、较大密度,而其含水量和孔隙度相对较低。高含砂量沉积物具有较高的体积压缩模量,同时又具有较大的抗压强度。

(2)含砂量作为影响海底沉积物压缩波速度变化的一个因素,它代表着沉积物中固体颗粒因素对沉积物压缩波速度的影响。含砂量增大对应着孔隙度减小和压缩波速度增大。

(3)实测数据统计和声学理论分析表明,含砂量增大引起海底沉积物压缩波速度增大的内在原因是含砂量增大引起沉积物的体积压缩模量变化比大于密度变化比。与前人数据统计得到的孔隙度增大则压缩波速度减小的结论一致,本质对应着沉积物的体积压缩模量变化比小于密度变化比,这与含砂量减小引起孔隙度增大的声速影响效应是一致的。

含砂量作为海底沉积物粒度命名的基本特征量,不仅具有沉积物粒度类型的沉积动力学含义,而且具有影响沉积物声速响应机制的模量变化和密度变化内涵,这使得含砂量是关联着海底沉积物的沉积动力环境、地形地貌特征和水声传播地声环境特性的重要参数,因而有关含砂量影响海底沉积物声速特性的深入研究,对于海底沉积声学、海洋地质学和海洋水声学等交叉学科的理论融合与综合应用具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T12763.8—2007, 海洋调查规范 第 8 部分: 海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T12763.8—2007, Specifications for oceanographic survey—Part 8: Marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [2] Yang Kunde, Xu Liya, Yang Qiulong, et al. Two-step inversion of geoacoustic parameters with bottom reverberation and transmission loss in the deep ocean[J]. *Acoustics Australia*, 2018, 46(1): 131—142.
- [3] Zou Dapeng, Luo Wei, Zheng Hongbo. First arrival cycle-based calculation methods of in situ sound speed and attenuation in sediments[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(1): 98—103.
- [4] Ballard M S, Lee K M. The acoustics of marine sediments[J]. *Acoustics Today*, 2017, 13(3): 11—18.
- [5] Lee K M, Ballard M S, Venegas G R, et al. Preliminary characterization of surficial sediment acoustic properties and infauna in the New England Mud Patch[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(4): 2111.
- [6] Robb G B N, Best A I, Dix J K, et al. The frequency dependence of compressional wave velocity and attenuation coefficient of intertidal marine sediments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120(5): 2526—2537.
- [7] Zhou Di, Chen Hanzong, Luo Youlang. The classification of modern sediments and sedimentary environments in northern south China sea by robust logratio methods[C]//Proceedings of the First International Conference on Asia Marine Geology. Beijing: China Ocean Press, 1990: 323—333.
- [8] 罗又郎, 冯伟文, 林怀兆. 南海表层沉积类型与沉积作用若干特征[J]. *热带海洋*, 1994, 13(1): 47—54.  
Luo Youlang, Feng Weiwen, Lin Huaizhao. Bottom sediment types and depositional characteristics of sediments of the South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 1994, 13(1): 47—54.
- [9] 范时清, 罗又郎, 郭忠信, 等. 南海海底沉积分带性[C]//南海海洋科学集刊, 第 8 集. 北京: 科学出版社, 1987: 55—60.  
Fan Shiqing, Luo Youlang, Guo Zhongxin, et al. Bottom sediment zonation of the South China Sea[C]//Nanhai Studia Marine Sinica, No. 8. Beijing: Science Press, 1987: 55—60.
- [10] Anderson R S. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments[M]//Hampton L. *Physics of Sound in Marine Sediment*. Boston, MA: Springer, 1974: 481—518.
- [11] Hamiltin 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.
- [12] 梁元博, 卢博. 海底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.  
Liang Yuanbo, Lu Bo. Physical mechanism for the seafloor sediment mechanical property affecting sound velocities[J]. *Haiyang Xuebao*, 1985, 7(1): 111—119.

- [13] Chen Minpen, Shidh Y T, Chyan J M. Acoustic and physical property of surface sediments in Northern Taiwan Strait[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1988, 21: 92—118.
- [14] 钱正明. 台湾东南外海海底沉积物物理、土力学和声学特性研究[D]. 台北: 台湾大学, 1989.  
Qian Zhengming. Physical, geotechnical and acoustic studies of the sea bottom sediments off South-Eastern Taiwan[D]. Taipei: Taiwan University, 1989.
- [15] Fu S S, Wilkens R H. Acoustic lance; New in situ seafloor velocity profiles[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 99(1): 231—242.
- [16] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物声速经验方程的分析与研究[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]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(4): 43—50.
- [17] 卢良鑫, 雷雄, 刘学伟. 中国南海北部陆坡孔隙度的求取[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(2): 601—607.  
Lu Liangxin, Lei Xiong, Liu Xuewei. Prediction of porosity in the north margin of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2013, 56(2): 601—607.
- [18] Long Jianjun, Zhou Huajian, Li Ganxian, et al. Relationship between sound velocity and physical mechanical properties of seafloor sediments in controlled three axis stress-strain[C]//2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin, China: IEEE, doi: 10.1109/COA.2016.7535668.
- [19] Pierce A D, Siegmann W L, Brown E. Suspension theory for the effect of silt particles on attenuation of compressional waves in marine mud sediments[J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2016, 29(1): 005003.
- [20] 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, 40(3): 462—468.  
Long Jianjun, Li Ganxian. Theoretical relations between sound velocity and physical-mechanical properties for seafloor sediments[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(3): 462—468.
- [21] Ballard M S, Lee K M, Muir T G. Laboratory P- and S-wave measurements of a reconstituted muddy sediment with comparison to card-house theory[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(6): 2941—2946.
- [22] Lee K M, Ballard M S, Venegas G R, et al. Preliminary characterization of surficial sediment acoustic properties and infauna in the New England mud patch[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(4): 2111.
- [23] Ballard M S, Costley R D, Sagers J D, et al. A comparison between directly measured and inferred wave speeds from an acoustic propagation experiment in Currituck Sound[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(1): 237—247.
- [24] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 32—46.  
Wang Dezhaoh, Shang Erchang. *Underwater Acoustics*[M]. Beijing: Chinese Science Press, 1981: 32—46.
- [25] 卢博, 黄韶健, 李赶先, 等. 在不同沉积物类型中的声速测量实验研究[J]. *海洋技术*, 2004, 23(1): 66—70.  
Lu Bo, Huang Shaohuan, Li Ganxian, et al. Experiment research on sound velocity measurement in different types of sediments[J]. *Ocean Technology*, 2004, 23(1): 66—70.
- [26] 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.
- [27] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 179—191.
- [28] Zhu Zuyang, Wang Dong, Zhou Jianping, et al. Acoustic wave dispersion and attenuation in marine sediment based on partially gas-saturated Biot-stoll model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1): 180—188.
- [29] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 322—323.  
Liu Zhaoshu, Zhao Haunting, Fan Shiqing, et al. *Geology of the South China Sea*[M]. Beijing: Science Publishing House, 2002: 322—323.
- [30] 苏广庆, 范时清, 陈绍谋, 等. 南海中北部沉积图集[M]. 广州: 广东科技出版社, 1989: 46—47.  
Su Guangqing, Fan Shiqing, Chen Shaomou, et al. *Sedimentary Atlas of the North-central South China Sea*[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 1989: 46—47.
- [31] Hamilton E L. Prediction of deep-sea sediment properties: state-of-the-art[M]//Inderbitzen A L. *Deep-Sea Sediments*. Boston, MA: Springer, 1974: 1—43.

# Influence of sand concentration variation on the compressed waves velocity in the seabed sediments

Li Ganxian<sup>1</sup>, Long Jianjun<sup>2</sup>, Ma Wenbo<sup>3</sup>

(1.CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China; 2.School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3.College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** Based on the statistical analysis of the acoustic physical parameters and sedimentary grain size characteristics of the South China Sea sediment samples, it is found that there are significant differences in the acoustic and physical properties for high and low sand content. Empirical formulae are established for sand content and compression wave velocity, porosity, water content and density of seafloor sediments. Based on the theory of sound velocity, the reason for the change of compressive wave velocity caused by the change of sand content is that the volumetric compressive modulus and density change with sand content. The reason for the increase of the compressive wave velocity caused by the increase of sand content is that the increase of sand content causes the compressive bulk modulus to change more than the density change. Combination of data statistics and theoretical analysis demonstrates that sand content is one of the important factors affecting the compression wave velocity of seafloor sediments. This study has important theoretical significance and application value for the acoustic inversion of seafloor sediment particle size parameters and sediment types, the establishment of geoaoustic parameter conversion models, and the exploration of seabed resources.

**Key words:** seabed sediment; compression wave velocity; sand concentration; bulk compressive modulus; porosity