

海底介质的声学特性研究*

鹿力成[†] 马力

(中国科学院声学研究所 中国科学院水声环境特性重点实验室 北京 100190)

2014-07-15 收到

[†] email: luce_1983@sina.com

DOI: 10.7693/wl20141102

Acoustic characteristics of the seabed

LU Li-Cheng[†] MA Li

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 海底作为声波在水中传播的下边界,其声学特性对水中声场分布的影响巨大。在近60年的研究中,海底沉积物的声学特性建模研究已取得众多成果,然而这些成果还远远不能满足现代化水声技术发展的要求。文章从基本的海底结构组成出发,在海底地声建模的基础上揭示出声波与海底的作用关系。

关键词 沉积层,地声建模,声速,密度,衰减

Abstract The seabed is the lowest boundary of sound propagation in the sea, so its acoustic characteristics have a major effect on the sound field distribution. In the last sixty years, modeling of the acoustic properties of seabed sediment has made much progress; however, it still does not satisfy the demands of modern underwater acoustic technology. In this article, based on the composition of the seabed, we present a geoacoustic model to describe the interaction of sound waves with the seabed.

Keywords sediment, geoacoustic model, velocity, density, attenuation

1 引言

在这个表面百分之七十被水覆盖的地球上,海水又占据了其中的百分之九十七,因此,海底可以形象地表示为盛满海水的盆底。就像人类对于外太空的探索与渴望程度已经超出了太阳系那样,人类对于自身居住地球的探索也在努力追寻中。在人类已经掌握的各种探测海洋的手段中,声学方法仍然是一个最有效的手段。在20世纪50年代,人类采用声学遥感的方法获得了海底的地形地貌。图1给出了全球的海底地貌^[1]。在图1中,各大洋海底存在着—座很高的海底山脊,形成了水下山脉。海底作为声波在海水中传播的下边界,

对声场的影响巨大,因此了解和获取海底介质的声学特性是解决水下声传播问题的关键因素。

在水声问题的研究中,通过对不同的海域建立合适的海底地声模型,使之能够应用于声场计算,准确地预报声场。地声模型被定义为海底对水中声波传播影响的具体描述,它详细描述了海底中各沉积层和岩层的真实厚度和各种特性,包括它们的测量值、外推值和估计值。完整的模型还需要包括水体数据、详细海深图、地貌图和海床剖面图,以得到各层的地形和斜度。在水声学、海洋地质学和地球物理学中,海底的地声模型属基础课题,它涉及地震学、沉积层学、地貌学、海床结构和重力学研究,以及地质史和其他学科。

一个完整的海底地声模型必须包括海底各沉

* 国家自然科学基金(批准号: 10774156, 11374323)资助项目

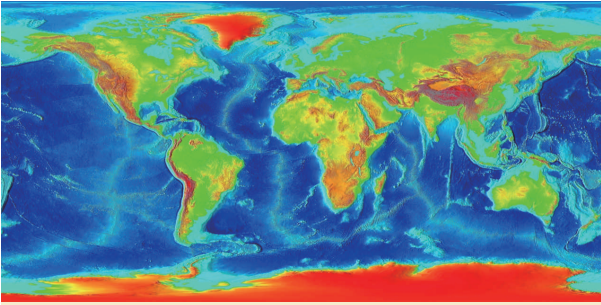


图1 全球大洋海底地形地貌图

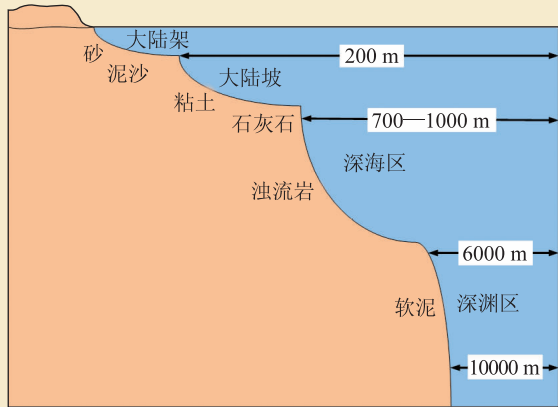


图2 依据海深划分海底介质主要类型

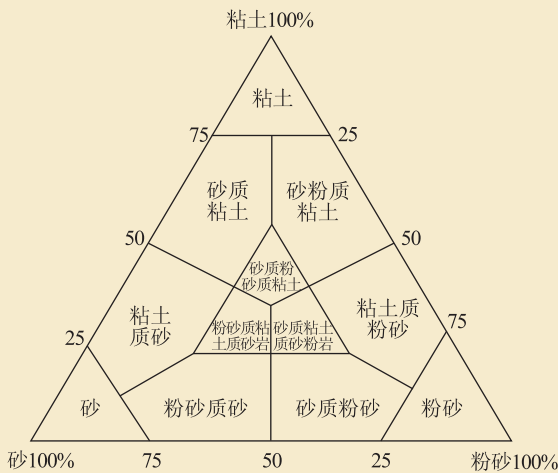


图3 海底底质的三角端元分类法

积层和岩层与声传播相关的几个物理参数：压缩波速度、剪切波速度、压缩波衰减、剪切波衰减、密度，以及这些参数的海底表层数值及其随深度变化的关系。

2 海底表层组成

在海底的表层覆盖着一层非凝聚态的物质，

根据海区的不同，这些物质的组成也各不相同。图2给出了典型的海底地形分布图，在浅海的大陆架和大陆坡区域，由于河流、风等带来的泥沙沉积以及地壳变迁，一般海底沙含量较高，海底介质相对较硬；而在深海区域，由于经过上千年生物沉积和海底火山等作用，海底主要是浊流岩，海底介质相对较软。

沉积层浅表特性是建立地声模型最重要的部分。研究这些特性时，一般是采用海底取样，并在实验室进行测量，然后把实验室测量结果修正到现场测量值。海底取样的样本长度一般不超过30 cm，一般采用重力取样获取，并尽可能地减小取样扰动所带来的误差。这种方法有很多缺点：一是不能得到海底的连续资料，只能获取离散点的数据；二是样本容易受到海水的冲刷而失去原貌，同时也失去了原有的压力、温度等环境条件；三是这种方法费事、费力，并且受制于海况条件，当海底很硬时不容易获取样本。但是这种方法是能够直接体现海底介质声学性质的方法，通常作为其他方法的验证标准。

由于自然因素的影响，一般浅海海底类型的组成成分相对比较复杂，同时含有砂、粉砂和粘土。根据大陆架沉积物中砂、粉砂和泥的含量，Shepard^[2]利用三角端元法将其细分为砂、粉砂、粘土、粉砂质砂、砂质粉砂、砂—粉砂—粘土混合物等类型，如图3所示。Hamilton^[3-6]将大量实地测量的沉积物样品加以分类，并总结出沉积物的物理性质和基本声学性质。沉积物分类方法和Shepard方法类似，只是对砂—粉砂—粘土混合物没有进行细分。在实验室中测量的压缩波(声波)速度采用脉冲技术(频率约200 kHz)，所有声速都被修正到23℃时1个大气压条件下的测量值，速度比是23℃时1个大气压条件下沉积物的声速除以23℃时1个大气压条件下与海底水相同盐度的海水声速。

表1和表2给出了典型的大陆台地环境和典型的深海平原、山地环境海底沉积物的密度、声速、孔隙率和声速比。Hamilton还根据测量得到的历史积累数据特性图，得出了平均特性量之间

表1 大陆台地(陆架和斜坡)环境条件下的泥沙沉积物密度、孔隙率、声速和速度比*

沉积物类型	密度(g/cm ³)		孔隙率(%)		声速(m/s)		速度比(沉积物声速/海水声速)	
	Av.	SE	Av.	SE	Av.	SE	Av.	SE
粗砂	2.034	...	38.6	...	1836	...	1.201	...
细砂	1.962	0.017	44.5	1.0	1759	9	1.152	0.006
很细砂	1.878	0.017	48.5	1.0	1709	14	1.120	0.009
粉砂质砂	1.783	0.014	54.2	0.8	1658	7	1.086	0.005
砂质粉砂	1.769	0.018	54.7	1.1	1644	7	1.076	0.004
粉砂	1.740	0.027	56.2	1.6	1615	6	1.057	0.004
砂—粉砂—泥	1.575	0.021	66.3	1.4	1582	7	1.036	0.005
泥质粉砂	1.489	0.014	71.6	0.7	1546	3	1.012	0.002
粉砂质泥	1.480	0.010	73.0	0.5	1517	2	0.990	0.001

* 表中 Av. 为样本的平均值, SE 为样本平均值的标准误差

表2 深海平原和深海山地环境条件下非石灰质沉积物密度、孔隙率、声速和速度比

沉积物类型	密度(g/cm ³)		孔隙率(%)		声速(m/s)		速度比(沉积物声速/海水声速)	
	Av.	SE	Av.	SE	Av.	SE	Av.	SE
深海平原								
泥质粉砂	1.454	0.024	74.2	1.4	1528	3	0.999	0.002
粉砂质泥	1.356	0.015	80.1	0.8	1515	2	0.991	0.001
泥	1.352	...	80.0	...	1503	...	0.983	...
白令海和鄂霍次克海								
粉砂	1.447	...	70.8	...	1546	...	1.011	...
泥质粉砂	1.228	0.019	85.8	0.9	1534	2	1.003	0.001
粉砂质泥	1.214	0.008	86.8	0.4	1525	2	0.997	0.001
深海山脉								
泥质粉砂	1.347	0.020	81.3	0.9	1522	3	0.995	0.002
粉砂质泥	1.344	0.011	81.2	0.6	1508	2	0.986	0.001
泥	1.414	0.012	77.7	0.6	1493	1	0.976	0.001

* 表中 Av. 为样本平均值, SE 为样本平均值的标准误差

的回归公式, 这些回归公式到现在仍然具有指导意义。

3 地声模型的建立

在地声模型的建立工作中, 首先是确定模型在水声学中需要海底的哪些特性, 然后是以合适的形式对特性进行测量, 并综合这些特性测量得

到有效数据。数据永远感觉不够, 建模者必须不断测量、总结, 并进行与声学有关的海底特性研究。在这些研究中, 当缺乏现场测量数据时, 必须依照已有的资料, 对有关特性进行合理的估值。这些估值通常是建立在从同一海区 and 同一类型去进行外推的基础之上。建模者依托对结构、地层、沉积层和岩石学的研究, 通常可以推断有关海域的模型信息。

在高频水声学中,可能仅对沉积物的头几米或头几十米感兴趣;而在低频水声学中,则必须提供整个沉积物柱列以及基岩的特性信息。在过去的60年中,有许多工作都致力于发展和建立地声模型。目前常见的地声模型有以下几种:Hamilton粘弹模型^[3-6]、Biot—Stoll模型^[7, 8]、Buckingham VGS模型^[9-11]和Chotiros—Isakson BIC—SQS模型^[12]。

Hamilton和他的合作者发表了一系列文章,阐述他们多年来的工作,将海底大陆架区域海底分为9类,并成功地建立了一种比较实际的地声模型。他们得到了海底声学、衰减系数和海底类型及频率的经验公式,在他们的模型中,声速与频率是无关系的,衰减系数与频率成线性关系。利用他们的经验公式得到的衰减系数在高

频段(>10 kHz)与实验符合较好。上世纪七八十年代,他们在美国声学学报(*The Journal of the Acoustical Society of America, JASA*)发表的文章目前还是被高度重视,显示出他们所做出贡献的重要性。

基于海底介质的多孔疏松特性,Biot和Stoll以及他们的合作者从理论上推导了多孔介质中的流体和沉积物骨架之间的相对滑动可以产生阻尼衰减波。从Biot—Stoll模型可以预知沉积物中的衰减系数表现为一种非线性关系,特别是在砂质或者泥砂质砂混合海底中。这个模型同时指出,沉积物的声速表现为一种非线性频散。因为缺少足够的实验证据支持Biot—Stoll模型,对于海底衰减系数与频率的非线性关系争论持续了数十年。在低频段,衰减系数值非常小,严重地阻碍了实验室中对它进行测量,因为如果要测量低频段的衰减系数,至少需要几千米距离才能够获得一个可探测的衰减。因此,目前只有非常少的低频海底衰减系数数据,用于检测粘弹海底模型和多孔疏松媒介模型。

考虑到在海底沉积物中颗粒与颗粒之间的相互作用,Buckingham利用一系列高频实验数据建立了一种颗粒—剪切应变(GS)模型。GS模型最近又被发展成为一种新的模型(VGS模型),即包括薄沉积层分子与颗粒之间分离的粘弹特性模型。在低频段,这种模型预报的声速频散曲线和与频率相关的衰减系数和Biot—Stoll模型很接近。在高频段,VGS模型声速频散曲线发散到GS模型的极限值;VGS模型中衰减系数与频率 f 的依赖关系为 f 的1次方关系,而Biot—Stoll模型中的衰减系数与频率的依赖关系接近 $f^{1/2}$ 。

在现已发表的浸水砂质实验数据中,声速的频散特性数据远大于Biot—Stoll模型所预报的数据。为了解释这种现象,Chotiro和Isakson提出了BICSQS模型,拓展了Biot—Stoll模型。这种拓展是利用一种颗粒与颗粒相互作用的物理模型(包括灰硅钙石流和剪切拖曳)来计算骨架模量。

近些年来,一些研究提供了一些数据支持Biot—

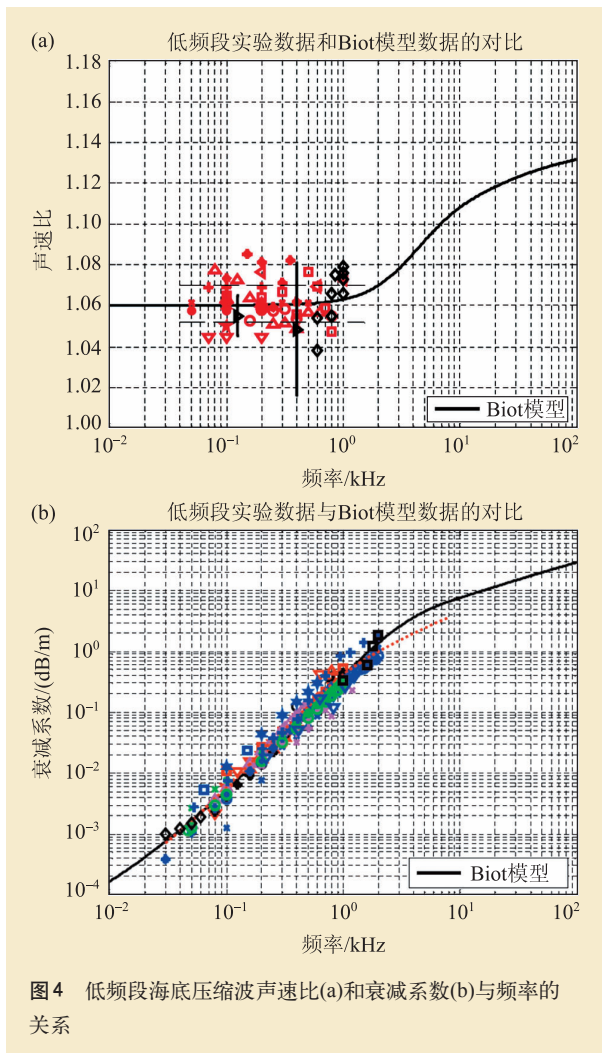


图4 低频段海底压缩波声速比(a)和衰减系数(b)与频率的关系

Stoll模型，并指出了粘弹模型的不准确性。为了揭示基于近些年发表的数据的海底沉积层声学物理机制，很多文章比较了宽带数据和模型，在这些比较中，还是没有低频衰减系数。周纪浔^[13]通过对诸多数据的分析与对比，得到了低频段海底的压缩波声速和衰减系数与频率的关系(见图4)，表明在所用的频率范围内，声速并没有明显的频散，而衰减系数与频率呈现非线性关系。周纪浔还将Biot—Stoll模型理论计算得到的声速和衰减系数数据(图中黑线)与实验数据进行了对比，结果表明，尽管在一定程度上两者符合较好，但是这些数据只针对低频段范围，对于高频段的声速和衰减系数数据还需要有进一步的实验数据进行验证。

在1999年秋天，SAX99综合性海底介质声学实验在墨西哥海湾附近进行。在SAX99实验中，声速在频率为125 Hz—400 kHz范围内，衰减系数在频率为2.6—400 kHz范围内。这些数据在频率所覆盖的范围内并没有被同一理论预报模型所接纳，表明海底地声建模需要进一步探讨和研究。但是这并不说明建立的模型的错误，由于海底的复杂多变特性，对于如此复杂的海底结构组成，要建立统一的海底地声模型面临着诸多的困难。

4 声波传播与海底作用关系

声波在水中传播与海底相互作用，任何地声模型所能给出的海底特性中最直接和声波相关联的物理参数是海底的声速、密度和衰减系数，海底表层的平整度以及海底体积的均匀程度。这些特性是衡量声波反射与透射的主要因素。一般的水声学问题都是将海底简化为液态，其中的剪切波忽略不计或者等效成压缩波的衰减，然而随着实验数据的积累和水声学中使用这些数据的频率降低，在很多情况下，海底不能简单地看作是液态，需要考虑海底剪切波的影响。

海底介质声学特性对声传播的影响主要表现在3个方面，即传播衰减、声场空间结构和水声信号波形在传播过程中的变化。三者都会同时呈现出海底特性和水体声速剖面相交织的共同影响。由于声场预报、主被动声纳和通信声纳等军事作战需求都是针对长程远距离，声波与海底的作用经过多次反射或者折射，因此对海底的声学特性只是针对大范围内的平均参数，对海底模型的假设不必过于详细，只要能反应出所在频段范围内的等效声学模型即可，这也是目前水声中普

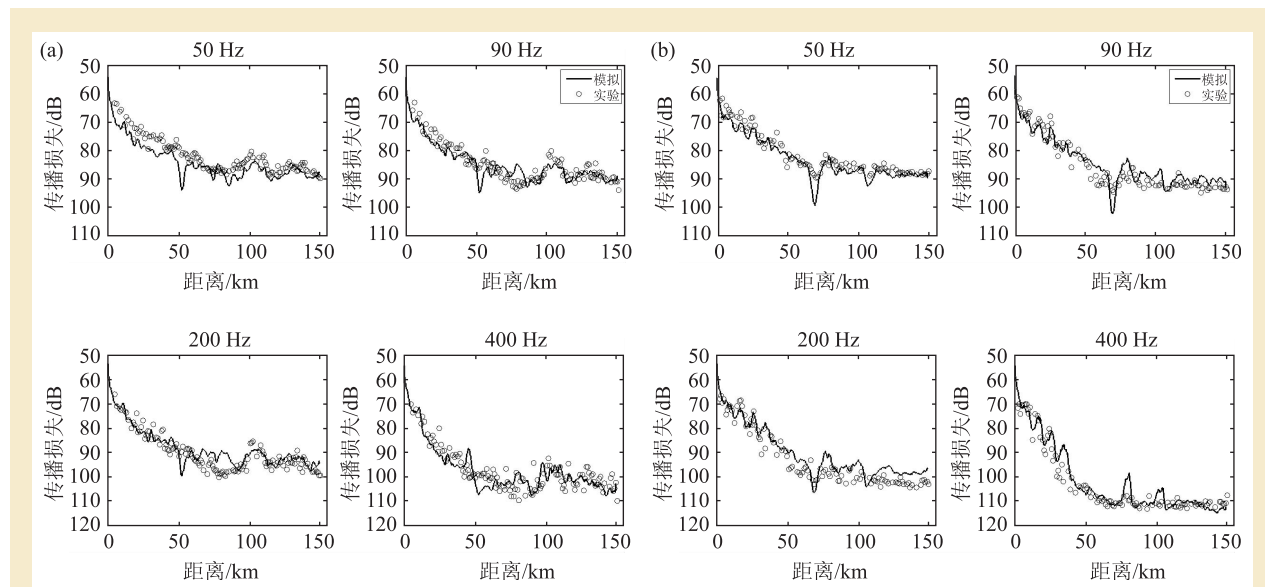


图5 大陆坡架区域海底建模预报声场两个航向的传播损失 (a) A航向的传播损失曲线；(b) B航向的传播损失曲线

遍采用的方法。

例如, 2012年在我国大陆坡进行了一次水声调查实验, 在充分了解海底地形变化和海底的结构组成上, 建立了百平方公里范围内的海底地声模型, 通过该地声模型预报的声场传播损失与海上实验数据对比(见图5), 两者符合很好。

然后不可忽视的一个事实是海底复杂多变, 尤其是在浅海区域, 海底介质的声学特性会随着位置的改变发生较大变化, 这种变化对声传播影响很大。李整林^[14]等人在实验中发现, 海底介质声学特性水平变化会引起声传播损失异常。

海底介质作用于声波在水中的传播, 因此声波的变化包含了海底介质的信息, 通过这些信息可以反演获得海底介质的声学参数。基于海底的散射特性, 很多研究学者致力于研究海底底质分类问题, 研究海底底质的背向散射特性, 频谱估计采用小波分析方法和神经网络等处理手段, 来获取海底的颗粒度、孔隙率等海底沉积层特性信息。伴随着人们对水声信道的认识、声场建模的发展和声场具有良好的低频相干特性, 低频段海底地声反演蓬勃发展起来, 这种方法可以大范围地获取海底介质声学特性, 因而一直是水声界中的热门话题, 吸引着国内外众多学者进行理论和实验的研究和探讨。

参考文献

- [1] <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html>
 [2] Shepard F P. J. Sediment Petrol, 1954, 24: 151
 [3] Hamilton E L, Bachman R T. J. Acoust. Soc. Am., 1982, 72: 1891
 [4] Hamilton E L. J. Acoust. Soc. Am., 1985, 78: 1348
 [5] Hamilton E L. J. Acoust. Soc. Am., 1978, 63: 366
 [6] Hamilton E L. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68: 1313
 [7] Biot M A. J. Acoust. Soc. Am., 1956, 28: 168
 [8] Stoll R D. J. Acoust. Soc. Am., 1985, 77: 1789

5 展望

海底介质的声学特性一直是水声学中的难点问题, 一方面在于它的特性很难直接得到, 另一方面不同海域它的结构组成复杂多变。海底介质的声学特性是声波频率的函数, 海底的声速和衰减系数随着频率的改变具有频散效应。最初的Hamilton粘弹模型假设海底声速不随频率改变, 实验数据证明, 海底的声速具有频散效应, 虽然Biot—Stoll模型指出了海底声速随频率的变化关系, 但是这种频散效应与实验数据在中低频段存在一些差异。

对于不同的水声传播问题, 所需要的海底介质声学特性各不相同。对于低频被动探测声纳, 更加关心的是海底介质分层结构和等效声学特性, 而对于低频和高频主动探测声纳, 海底表层的起伏和海底介质的体积不均匀性对其影响巨大。针对这些诸多的用户使用者, 地声模型还需要发展, 建立一个更加完备的海底地声模型还需要做更多的努力, 这种努力既体现有更深的、甚至整个沉积层柱列的描述上, 又体现在对各分层的精细描述上。

致谢 感谢高天赋研究员对本文提出诸多宝贵意见。

- [9] Buckingham M J. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108: 2796

- [10] Buckingham M J. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 117: 137

- [11] Buckingham M J. J. Acoust. Soc. Am., 2007, 122: 1486

- [12] Chotiros N P, Isakson M J. J. Acoust. Soc. Am., 2004, 116: 2011

- [13] Zhou J X, Zhang X Z, Knobles D P. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125: 2848

- [14] 李整林, 李风华, 彭朝晖. 中国科学, 2004, 34: 247