海底的声学特性
实验技术及地中海的若干实例

Tuncay Akal

北大西洋组织 大西洋最高同盟指挥中心反潜武器研究中心 (NATO SACLANT ASW Res. Cen.)

La Spezia, Italy

摘要 海底声学特性主要取决于海底分层沉积物的物理特性和海底、次海底的粗糙度。在过去的十年间，已取得很多样品和海底照片，并做了声学测量，从而，增进了我们对影响海底沉积物声特性的机理的了解。北大西洋组织大西洋最高同盟指挥部反潜武器研究中心(NATO SACLANT ASW) 提供了在地中海不同区域的海底声学特性的研究结果，对其观察方法和数据分析也作了简单的讨论。给出了影响海底声学特性的沉积物特性之间的关系，并将结果与声学测量进行了比较。

引 言

由于海底的物理特性将影响声能在这个介质中的传播，了解这些特性和他们对声参数的关系是对于海洋沉积物的声的物理性质的了解所必不可少的。地中海海底的物理和声学特性的研究在SACLANT ASW 研究中心已引起相当的重视，并且早在六十年代初，就作了大量理论和实验的研究。这些研究导出的主要重点是：

1．确定在各种不同频率和不同入射角的情况下，海底的反射损失大小，反射波畸变和散射大小。

2．建立声参数与海底环境特性的关系，例如，与沉积物的物理特性、沉积物的分层和海底粗糙度的关系。

地中海是世界上主要的封闭盆地之一，它是由一个通过西西里海峡浅海岩层分隔为东、西两个盆地所组成(如图 1)。这些盆地具有很多地文学和沉积学的特征是海洋盆地所特有的，例如：充分发展的大陆架(在地中海比较狭窄)，大陆坡(陡的，一般被海洋狭谷所切割)，大陆隆和深海平原(在西盆地水深约 3000 米，在东盆地最大深度为 5081 米的广阔区域)，那些地区的沉积物大多由混浊的海流淤积而成。这两个盆地可以再细分为边界十分复杂的小盆地。西盆地包括阿尔沃兰—巴利阿里区域，这里有一个广阔的深海平原，和中间为深海平原，并具有它特有的火山海峰的第勒尼安海盆。东盆地和西盆地的显著差异主要包括：①爱奥尼亚

的小深海平原，②从爱奥尼亚延伸出来的地中海海脊，盘踞在勒凡特海盆中央部分，③围绕着地中海海脊的小平原，④尼罗河冲积锥。

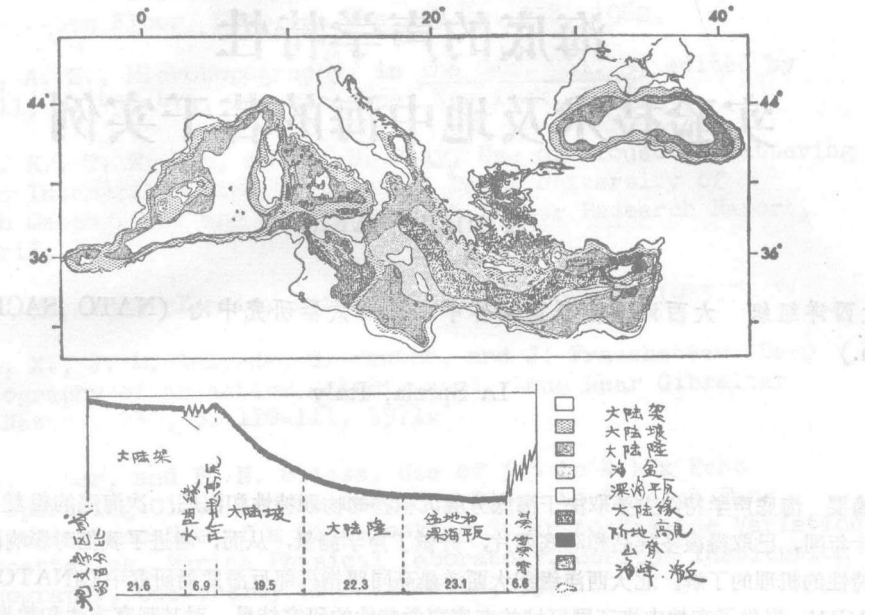


图 1　地中海和黑海主要的地文区(根据 Akal 1972年)

获得数据的方法和分析

声学参数：

我们目前对海底的认识大多数是通过利用以声学为工具的地球物理学方法获得的，在对海底的研究中，地震连续剖面、反射和折射的测量是声学的三种重要和直接的应用。通常，连续剖面方法给出了海底和次海底结构的粗略图象，而反射和折射的测量给出了层中声速、声损耗、信号畸变和脉冲响应的详细信息。

SACLATCEN 已利用反射方法去调察海底的声学特性，着重于反射强度，反射波形畸变和散射的研究。由于所有这些参数都是频率和角度的函数，以发射船和接收船配合，采用爆炸声源用以复盖宽的频带和不同的入射角。

测量反射系数时，采用两种主要方法，如图 2 所示。固然，使用浅声源和浅接收器的方法，操作很迅速，但使用深声源和深接收器时，也有自校准的优点，它不包含表面反射，射线路径通过比较恒定的环境，声照射的范围很小。

通常，在两条船上记录的信号采用数字形式。图 3 表示了最常用的设备方框图。记录信号的一个典型实例如图 4 所示，其中，直达信号和海底反射信号是明显的。

有多种不同方法从实验结果中计算反射损耗。在 SACLANTCEN 所使用的方法是 O. Hastrup 提出的，参考文献 [Hastrup 1966 a,b,c., 1967 a,b., 1968,1969 a,b] 给出了这些方法的详细说明。下面简单介绍这种方法。

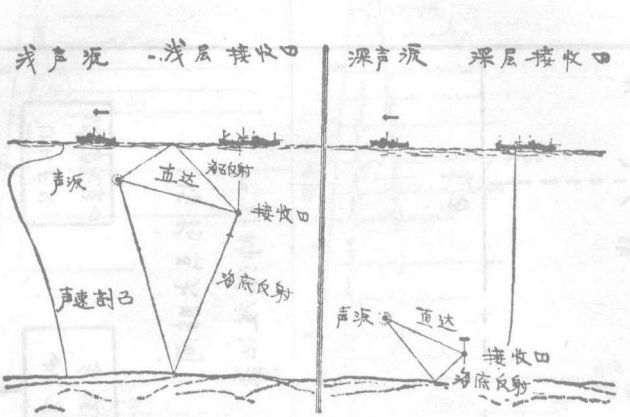


图 2 海底反射系数测量方法

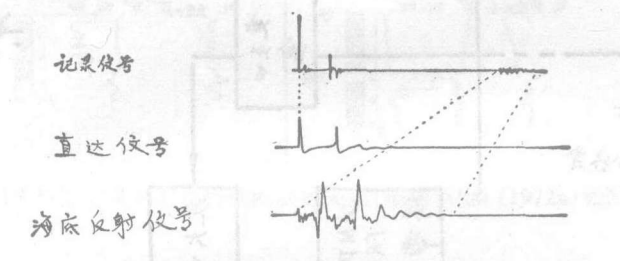


图 4 记录信号和它的组成的一个实例图

1. 对水—沉积物界面，当第一个海底反射层有足够厚，以致从水—沉积物界面反射的爆炸声信号与较深层的反射信号在时间上能够分开时，可以用简单的方法计算与频率无关的反射损失，即将反射损失看作为脉冲振幅和第一个反射信号的峰值（对相位移、吸收、和扩展损失予以修正后）之比。记录的信号和反射损失为掠射角的函数，与岩芯的物理特性一起表示在图 5 中[Michelozzi 1973, Akal 等。1972]。

2. 对分层海底，由于海底通常是分层的，对整个海底的反射损失因为与频率有关，则不能由振幅峰值方法得到，在这种情况下，分析（图 6）是基于所考虑的海底视作线性系统，并且，利用付立叶变换从直达信号与反射信号的“反卷积”来计算它的传递函数（或反射系数）。作为频率函数的相位移和反射损失的实例也表示在图 6 中。

反射系数也能用脉冲响应在时间域上来描述，即传递函数的反付立叶变换，也如图 6 所示。这里，由于用了 Hovem 提出的(“去卷积”处理方法（图 7），气泡脉冲的影响是不出现的。图 8 表示了在测量反射系数时，用这种分析技术所得到的若干结果。

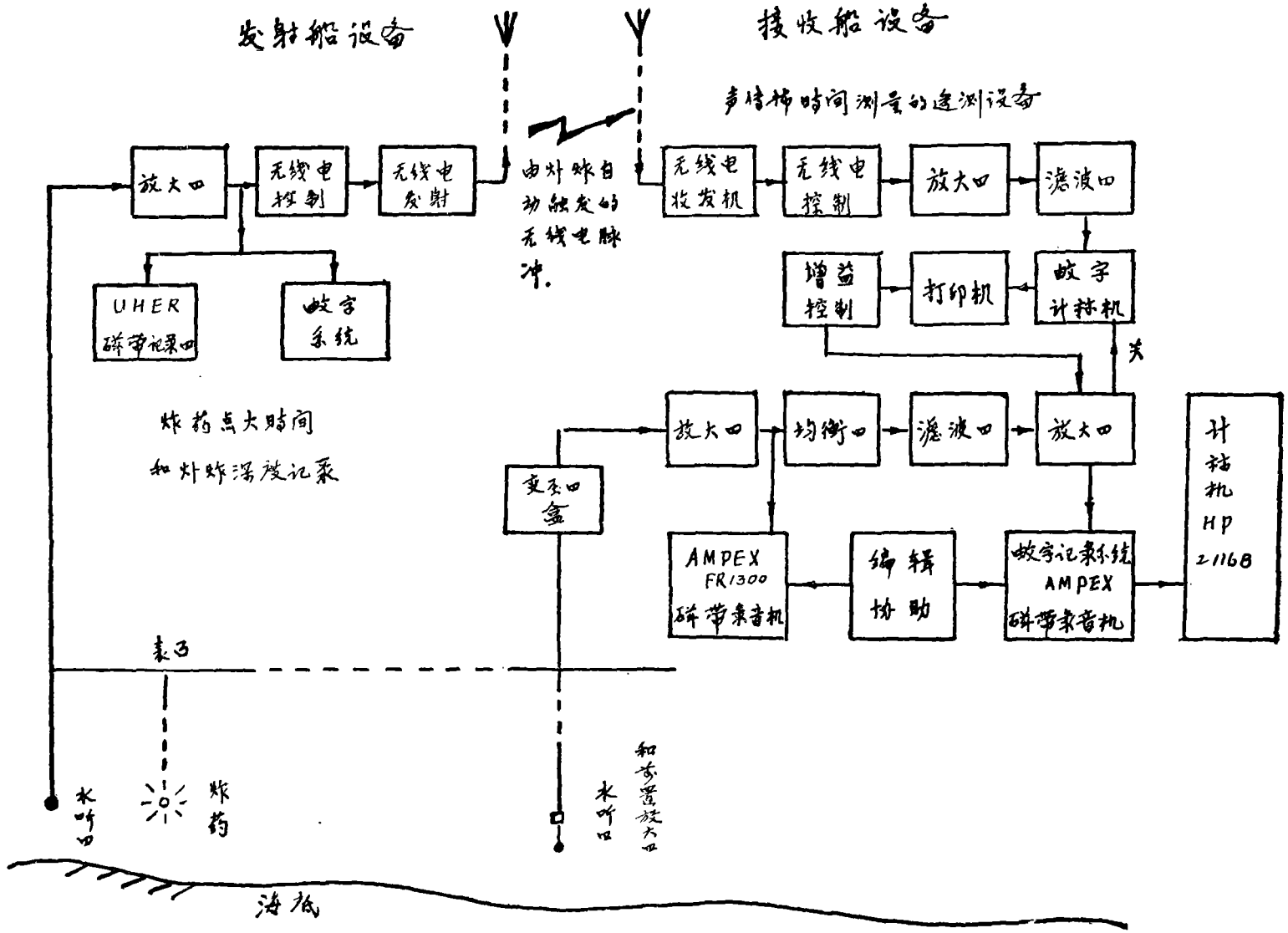

发射船设备
接收船设备
声信标时间测量的遥测设备
放大器
无线电控制
无线电发射
由炸弹自动触发的无线电脉冲.
无线电收发机
无线电控制
放大器
滤波器
UHER 磁带记录器
数字系统
增益控制
打印机
数字计时机
关
炸药点火时间
和炸弹沸破记录
放大器
均衡器
滤波器
放大器
计算机 HP 21168
变压器盒
AMPEX FR1300 磁带录音机
编辑协助
数字记录系统 AMPEX 磁带录音机
表面
水听器
炸药
水听器
和前置放大器
海底

图3 设备方框图

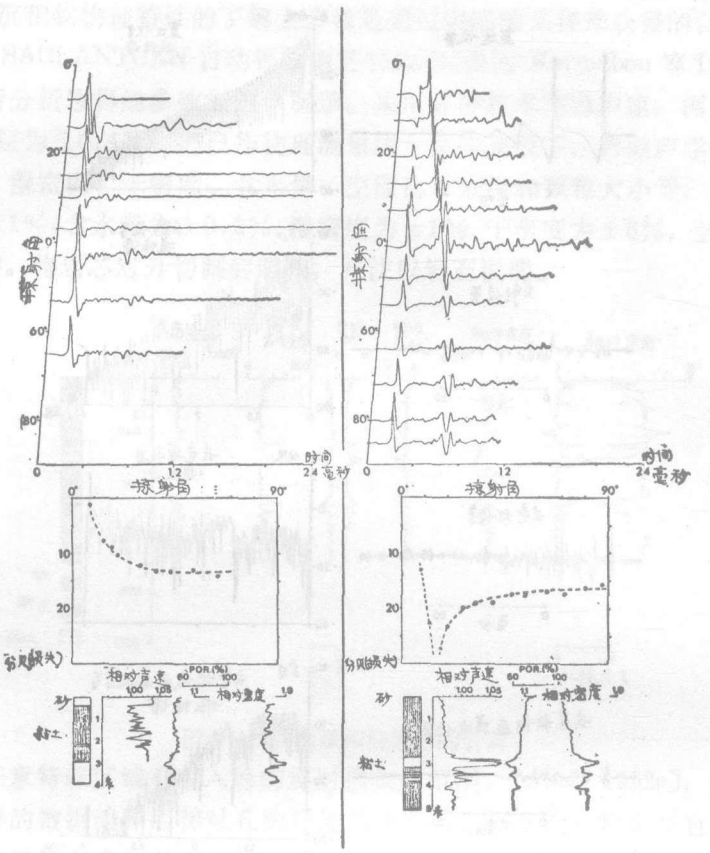


图 5　记录信号和反射损失与掠射角和岩芯特性的函数关系[根据 Akal (1972a)和Michelozzi (1973)]

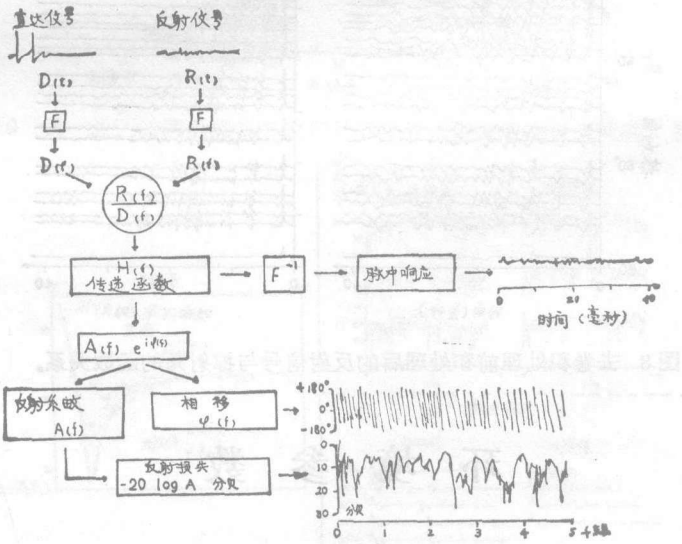


图 6　分层海底的数据分析技术

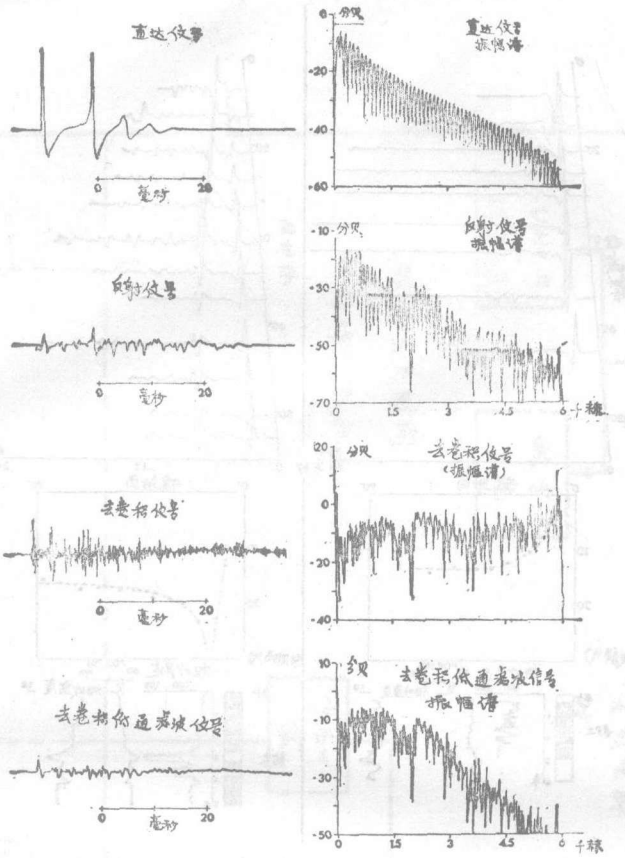


图 7　消除气泡影响的处理技术[根据 Hovem 1969]。

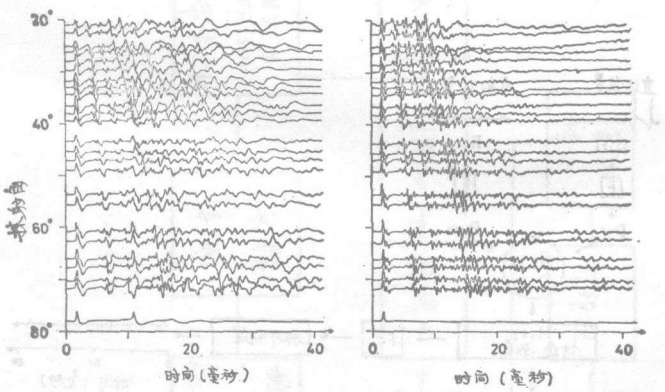


图 8　去卷积处理前和处理后的反射信号与掠射角的函数关系。

环 境 参 数

沉积物的物理特性

海底声学研究的重要任务之一是从已知的沉积物物理特性能在多大程度上预测到海底

反射系数。我们对沉积物物理特性的了解大多数是通过岩芯的采样来获得的。岩芯用长 12 米、直径为 12 厘米的 SACLANTCEN 自动锁紧取芯管取得[参阅 Kermabon 等 1966]，沿岩芯每隔 2 或 5 厘米进行分析取得的参数如图 9 所示。采用脉冲技术测得声速，测量精确度对粘土为 ±0.1%，对砂层为 ±0.4%。把已作物理测量的一段样品取下，再做声学测量。所谓物理测量包括孔隙度、湿密度、干密度、含水量、空隙比、强度和颗粒大小等，估计其精确度大约是：孔隙度为 ±1%，含水量为 ±0.2%、湿密度为 ±1%、干密度为 ±6%，空隙比为 ±0.2% [Kermabon, 1967]。将岩芯对开切割后照相，并注以岩石说明。

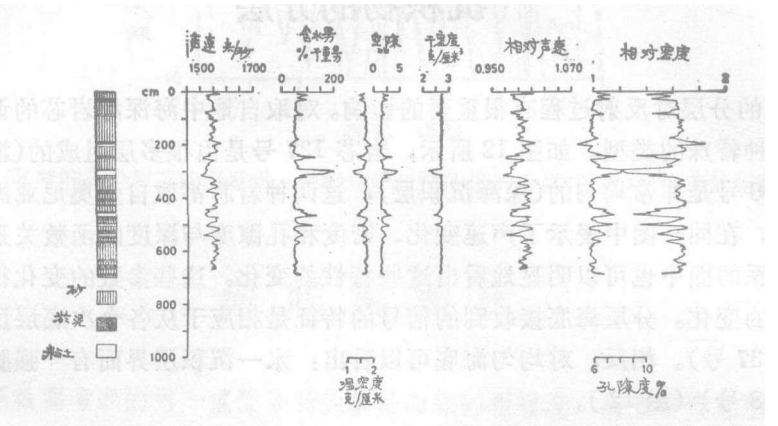


图 9　参数测量和沿岩芯的计算

为了确定对任意特殊区域垂直入射的反射损失的范围，[Akal 1962a]，由在这区域取出的所有岩芯所测得的数据给出的相对孔隙度能绘出曲线，据此能计算出垂直入射反射系数，就给出了反射损失对孔隙度的关系[图 10]。

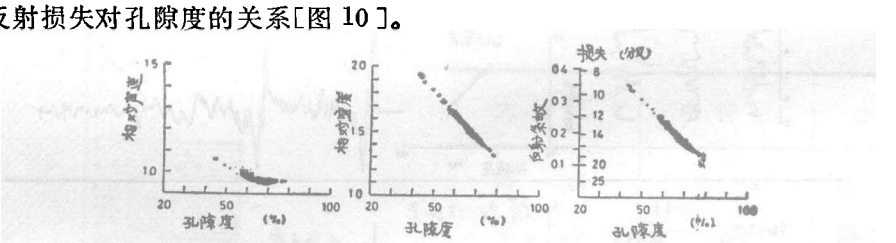


图 10　某一海区的若干测量参数和计算垂直入射海底损耗之间的关系。

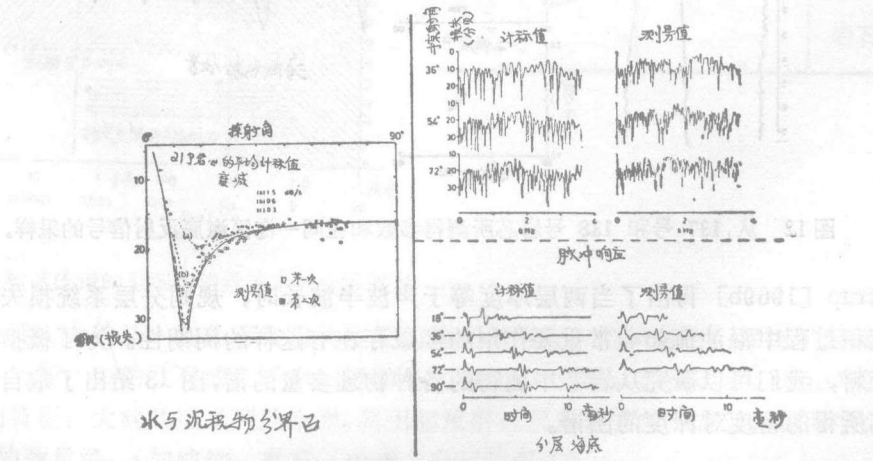


图 11　对水—沉积物界面和分层海底的测量和计算结果。[根据 Hastrup 1969a]

众所周知，海底反射系数能够表示为压缩和切变速度、压缩和切变衰减和密度的函数。由于我们的分析既不包含衰减的测定，也不包含切变速度的测定，这些量是由我们的物理测量结果，使用了 Hamilton 所得结果而推导出来的[1971 a,b 和 1972]。然后，这些数据输入计算机以预测海底损失和脉冲响应。这些测量和计算结果如图 11 所示，并可见有非常好的一致性[Hastrup 1969a]。

沉积物的分层

10 米以上的分层对反射过程有很重要的影响。对取自地中海深海岩芯的调查看出，它们大致可分成两种特殊的类型。如图 12 所示，岩芯 137 号是由很多层组成的(混浊的沉积层)，相反，岩芯 138 号是非常均匀的(深海沉积层)，这两种岩芯都取自爱奥尼亚海盆，两处相隔大约 220 公里。在同一图中表示了声速变化、密度和孔隙度与深度的函数关系。从声速和密度与孔隙度关系的图中也可以明显地看出这些特性的变化。这些参数的变化很自然的要引起海底反射特性的变化。分层海底接收到的信号的特征是相应于从各个次底层反射的多个到达的信号(岩芯 137 号)。相反，对均匀海底可以看出：水—沉积层界面有一强脉冲，然后逐渐衰减（岩芯 138 号）（图 12 ）。

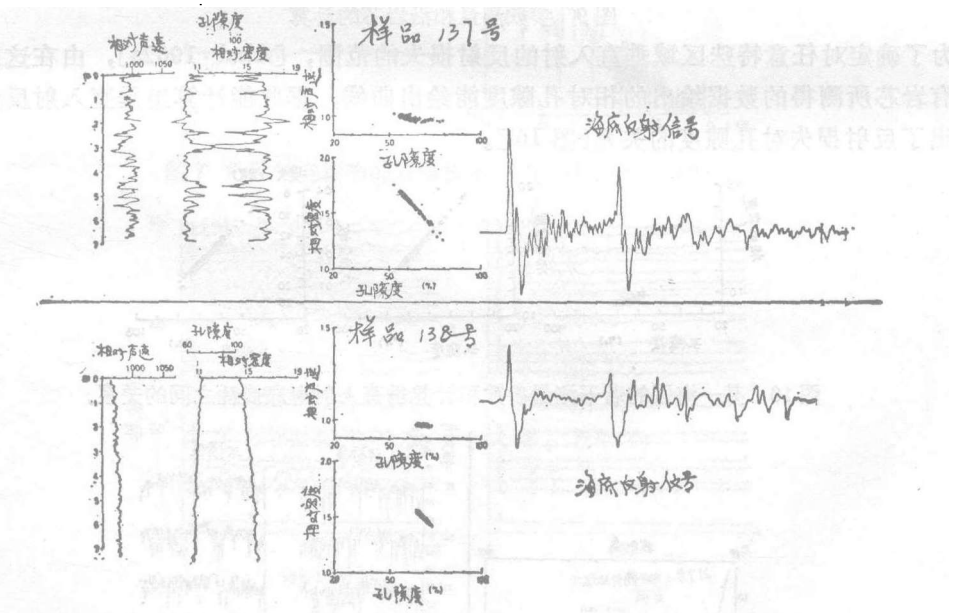


图12　从 137 号和 138 号岩芯所测得参数和在同一海区海底反射信号的采样。

Hastrup [1969b] 得出了当两层厚度等于声波半波长时，规则分层系统损失非常低的结果。在沉积过程中混浊流起非常重要作用的区域存在有这样的周期性。为了概括关于沉积物分层的资料，我们可以研究从岩芯中测得的各种物理参量的谱，图 13 给出了取自同一区域的三个岩芯所得的密度对深度的图谱。

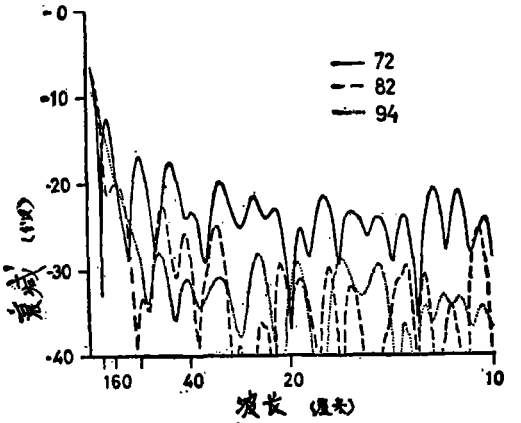
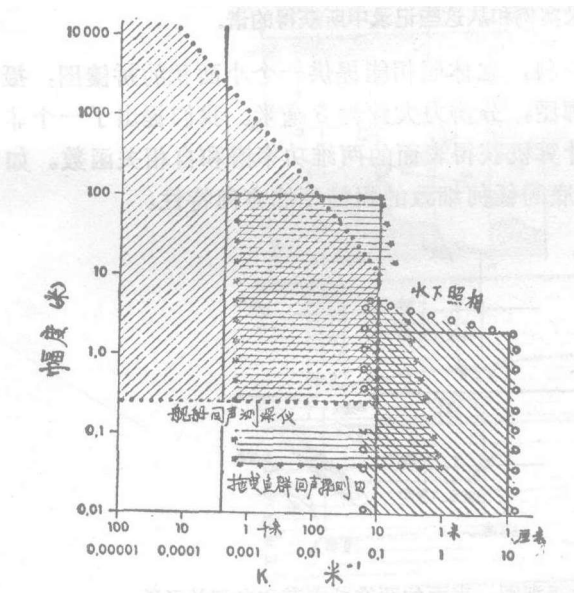


图 13 取于同一区域的三个岩芯的密度谱．坐标是归一化的谱的振幅(分贝)沿岩芯的距离单位是波长。

海 底 粗 糙 度

研究反射系数要考虑的另一重要环境参数是海底的粗糙度。海底包含地形粗糙度的一个宽谱，从大约几十到几百公里到大约几厘米，这个非常宽广的谱能分成三个部分，如图 14 所示。



大 特 征	中 特 征	小 特 征
海 岭	砂 洲	波 纹
深海平原	谷	卵 石
海 沟 等	小山等	山 峰
		岩石露头等

图 14 海底粗糙度的谱的范围和测量技术的分辨能力

1．大特征：大约几十到几百公里为主要的地文学特征，例如海岭、深海平原，海沟等。

2．中等特征：大约几百或几千米，通常是大特征的一部分(砂洲、谷、小山等)。

3．小的特征：大约几厘米到几十米，是引起反射过程最重要的一部分，因为它们与声波波长有相同的数量级，(如波纹、卵石、山峰、岩石的露头)。

由于使用了回声测声仪等测量技术，使我们对海底大尺度特征有相当好的认识。另方面，关于小尺寸的粗糙度由于测量上的困难，使我们知道得很少。图 14 比较了用以研究海底粗糙度的设备的分辨率。

在 SACLANTCEN 测量了小尺寸粗糙度，它是借助一个立体照相机和一个 50 千赫被拖在接近海底（距离 5—10 米）的窄带回声测深仪来测量的。这在 SACLANTCEN 是一项最新的发展，我们还没有收集到很多可供分析的记录。但是，在水深小于 200 米时，这种方法是能很好工作的。图 15 表示了不同采样技术所得到的记录的实例和从这些记录中所获得的谱。

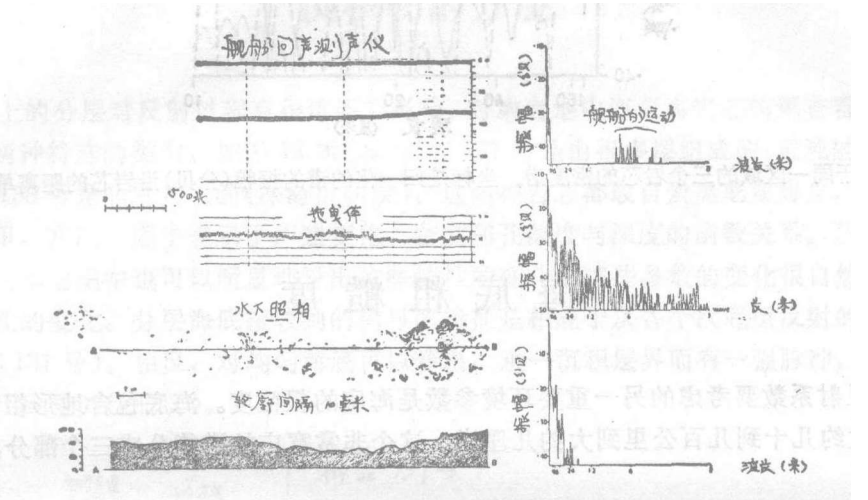


图 15　用不同技术所获得的记录实例和从这些记录中所获得的谱。

鉴于窄带回声测深仪提供沿一条轨迹的资料，立体照相能提供一个小面积的拼镶图，摄影测量则能用以提供海底细微尺度的海底轮廓图，分辨力大约为 5 毫米。我们提出了一个非常简单的将这些图象数字化的方法，能通过计算机获得表面的两维功率谱和自相关函数。如图 16 所示，用这种技术可以很容易地发现海底的任何细致的粗糙度的方向特性。

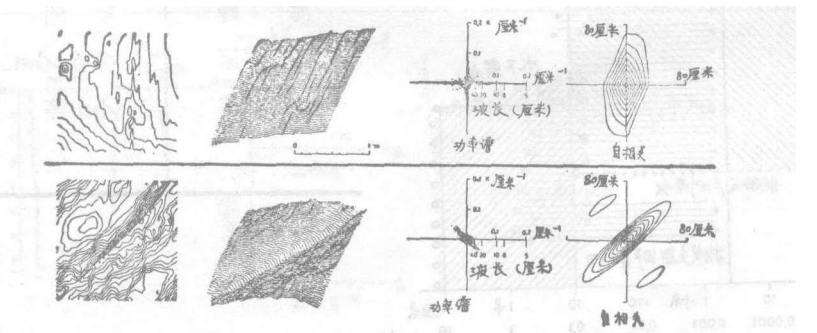


图 16　立体照相所拍得的轮廓图，表面的透视图，表面的两维功率谱和自相关函数。

地中海某些地文区沉积物的物理特性

图 17 表示了取得沉积物物理特性的资料的区域。图 18 表示了从地中海不同地区最近钻

孔的位置和同时在其邻近记录下来的水深剖面图。对每一区域作出了概括数据的图,(图19—27)计有:



图 17　最高同盟指挥部(SACLANTCEN) 钻孔的位置。

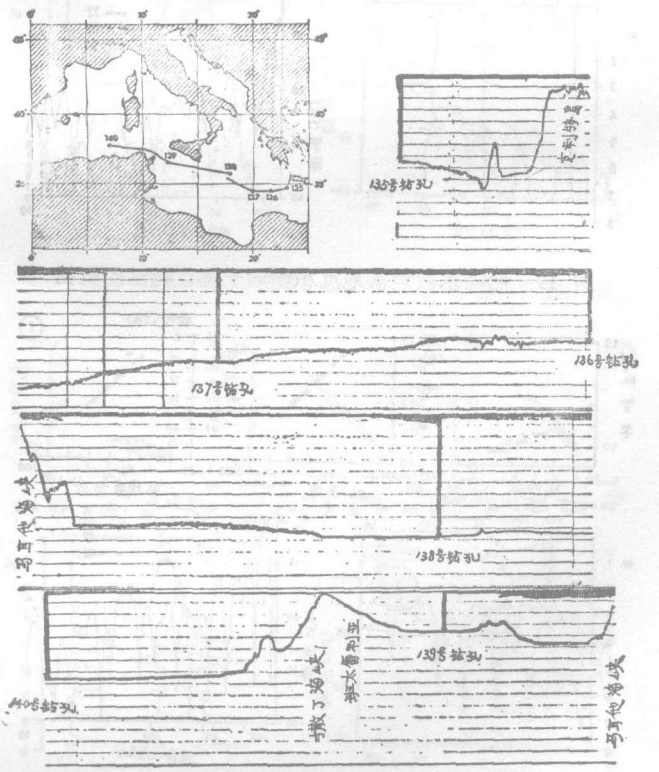


图 18　最高同盟指挥部(SACLANTCEN)钻孔位置和回声测深记录。

1．在上面部分：孔隙度对相对声速、相对密度、和计算出来的垂直入射的反射系数。

2．在左下方：相对声速、孔隙度和沿着一个典型岩芯所测得的相对密度。

3．在右下方：沿着在这区域取得的一些同岩芯所测得的相对密度的谱。

1．图 19 西阿尔波兰盆地，在西部盆地对沉积学的研究已作了广泛的采样(1971．Gehin)。从这区域取得的岩芯看出，具有若干条砂层的均匀物质想必是混浊流所引起的。从图中可见，均匀物质有大于 60％的孔隙度，多数数据落在 60％—80％之间，其声速小于水中声速。相对密度的谱指出构成的分层厚度大约为 12，30，50，160 和 300 厘米。

2．(图 20)北巴利阿里盆地：取于这区域的岩芯为包含有砂、淤泥和粘土交替的层，那里，对 45％到 75％孔隙度的数据点是等分布的，典型分层厚度在 10—250 厘米中变化。

3．(图 21)厄尔巴岛以北浅滩：从这区域取得的岩芯看出，也是粘土、淤泥和砂的混合层，孔隙度在 40％到 80％之间变化。

4．(图 22)厄尔巴岛东南浅滩：可以看出这区域有与北面完全不同的特性：岩芯包括均匀的带有若干砂层的粘土，图中大多数据点落在孔隙度为 55％—80％范围内，只有少数几个点有较低的孔隙度，对应于砂层。大约 3 米厚的层是这区域取出的多数岩芯共同特征。

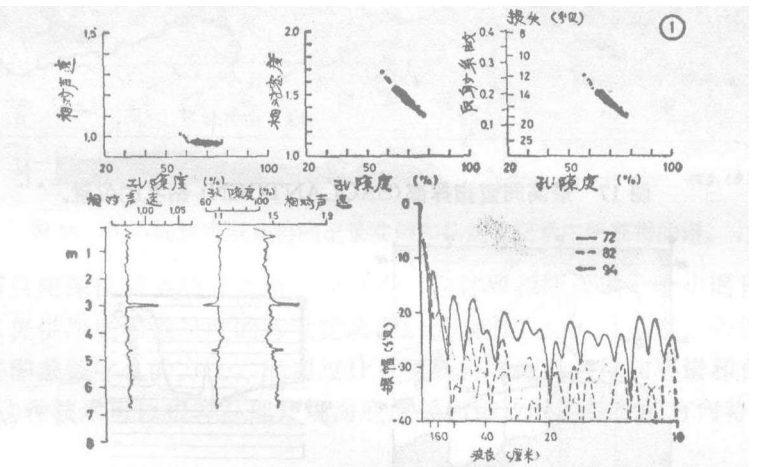


图 19　西阿尔波兰盆地沉积物若干物理特性的概括

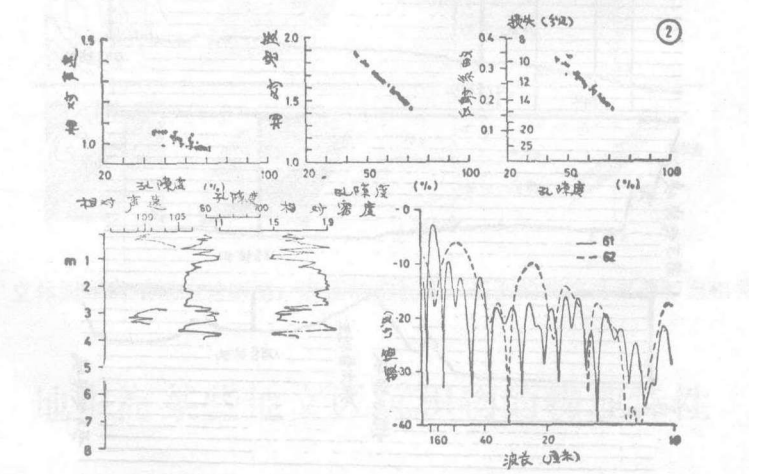


图 20 北巴利阿里盆地沉积物若干物理特性的概括。

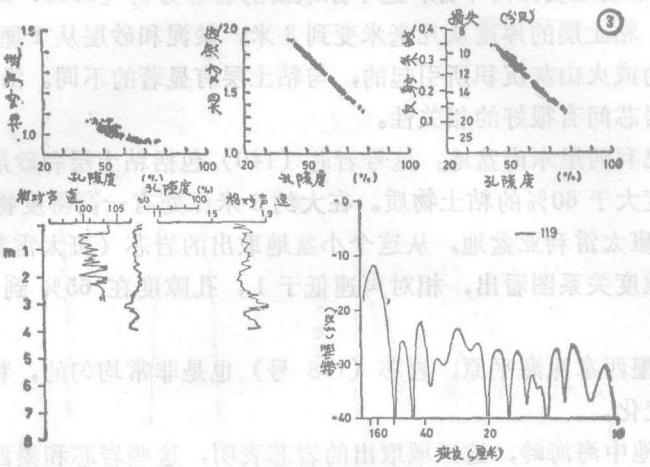


图 21 厄尔巴岛以北浅滩沉积物若干物理特性的概括

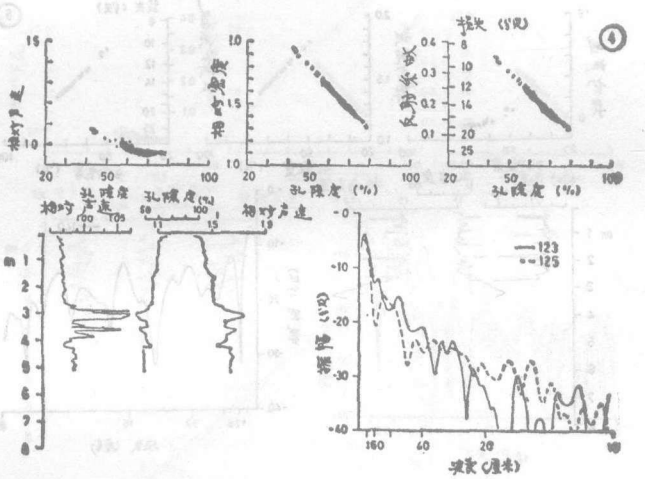


图 22 厄尔巴岛东南的浅滩：沉积物若干物理特性的概括

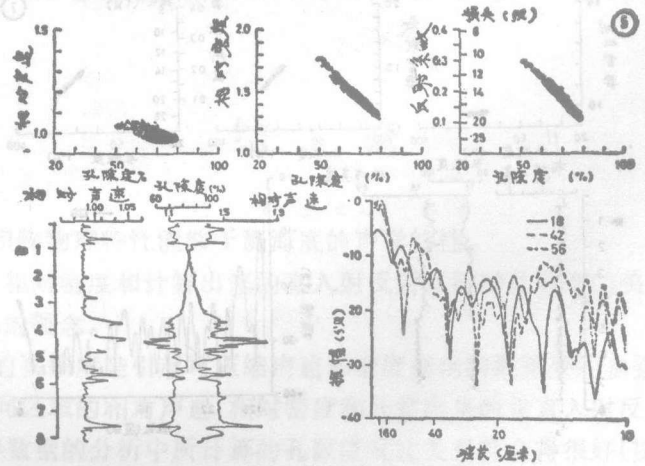


图 23 蒂勒尼安深海平原：沉积物某些物理特性的概括。

5.（图 23）蒂勒尼安深海平原，这平原取出的岩芯分析［1968. Kermabon等］表明有粘土、淤泥和砂层。粘土层的厚度从几毫米变到 3 米，淤泥和砂层从 1 厘米到 1 米变化，粗糙物质大多是混浊的或火山灰沉积所引起的，与粘土层有显著的不同。沿着岩芯所测得的相对密度谱表示：各岩芯间有很好的相关性。

6.（图 24）巴利阿里东南盆地：这号岩芯（140）包括粘土层和砂层的交替，数据点落成两串，带有孔隙度大于 60%的粘土物质。在大约 3 米深处有一高密度物质。

7.（图 25）班太雷利亚盆地，从这个小盆地取出的岩芯（班太雷利亚岛的东南）是非常均匀的，由孔隙度关系图看出，相对声速低于 1，孔隙度在 65% 到 80% 间变化。［Akal 1972b］

8.（图 26）墨西拿深海平原，岩芯（178 号）也是非常均匀的，粘土物质的孔隙度在 65%—75%之间变化。

9.（图 27）地中海海岭，这区域取出的岩芯表明：这些岩芯和墨西拿深海平原取得的岩芯有完全不同的结构，他们包含有不同厚度和颜色的粘土层、淤泥层和砂层，物质的孔隙

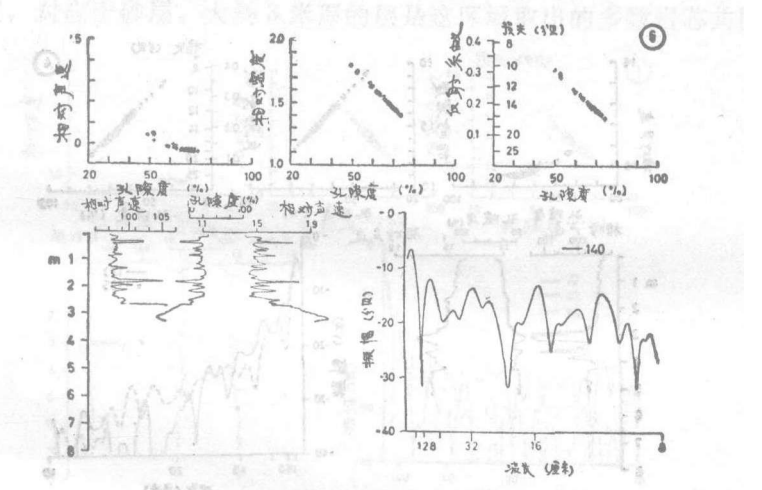


图 24 巴利阿里东南盆地：沉积物某些物理特性的概括。

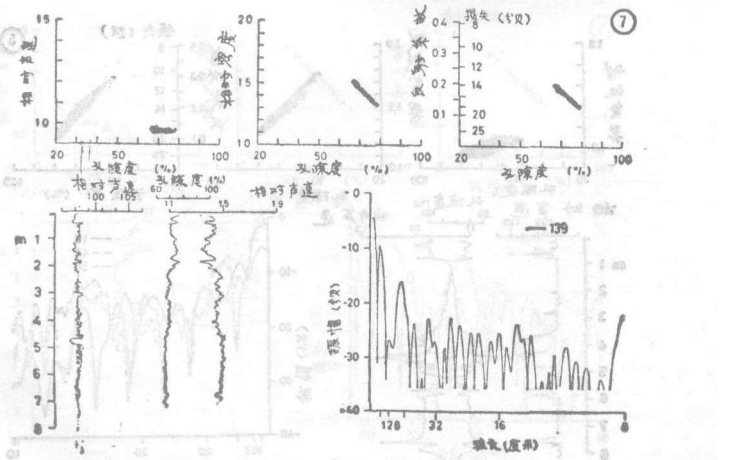


图 25 班太雷利亚盆地：沉积物某些物理特性的概括。

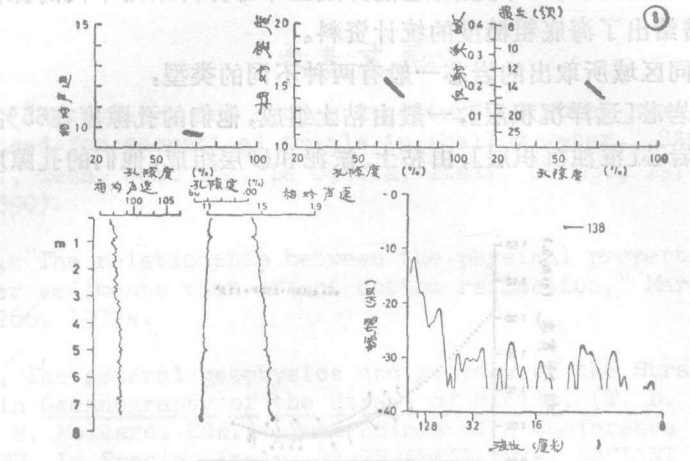


图 26 墨西拿深海平原某些物理特性的概括。

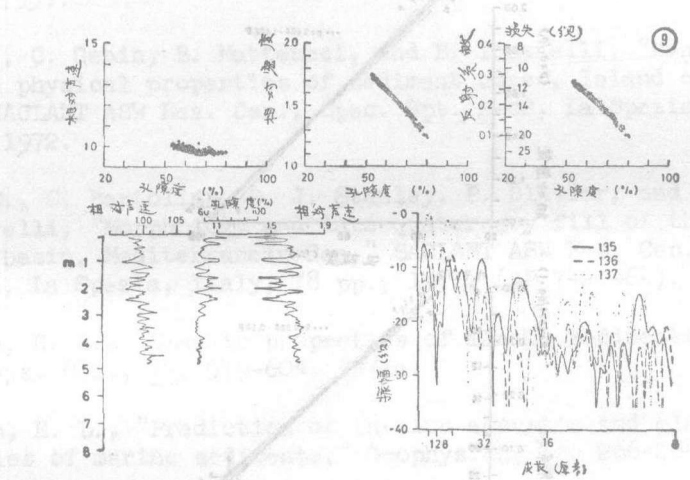


图 27 地中海海岭某些物理特性的概括。

度在50%到80%间变化。多数数据落在50%到70%间、有很多层他们彼此间的厚度有很好的相关性。

结　论

1．由已知的沉积物物理特性能够予测海底的声学特性。

2．由相对声速、相对密度和计算出来的直入射反射系数对孔隙度的关系图能给出某个区域声学特性的一个总的概念。

3．海洋沉积物的孔隙度是引起可压缩声速和密度变化的最重要的参数。

4．在地中海不同区域的相对声速、相对密度和计算出来的垂直入射反射系数对孔隙度之间的关系与从全世界数据的分析中所计算的孔隙度统计关系符合得很好(图 28)。

5．分层资料能够由沿岩芯所测得的各种物理参数的谱所概括。

6．海底包括地形粗糙度的一个宽谱，它能分成三个部分并采用不同的探样技术，海底粗糙度的单变和双变谱给出了海底粗糙度的统计资料。

7．从地中海不同区域所取出的岩芯一般有两种不同的类型：

（1.）均匀岩芯[远洋沉积层]，一般由粘土组成，他们的孔隙度在65％到80％间变化。

（2.）分层岩芯[混浊沉积层]，由粘土、淤泥和砂层组成，他们的孔隙度在40％到80％间变化。

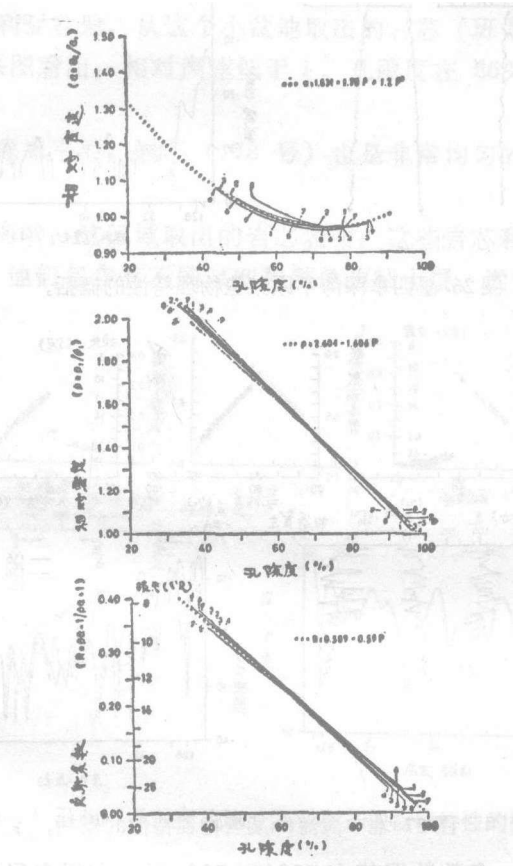


图 28 地中海不同区域的孔隙度关系与全世界的数据的关系比较，1.西阿尔波兰盆地，2.北巴利阿里盆地，3.厄尔巴岛以北浅滩，4.厄尔巴岛以南浅滩5.蒂勒尼安深海平原，6.巴利阿里东南盆地，7.班太雷利亚盆地，8.墨西拿深海平原，9.地中海海岭。

张学琦　译

李允武　校

参考文献

Akal, T., "Bathymetry and bottom structure of zones near the Island of Elba used for acoustical trials in shallow water," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Memo 162, La Spezia, Italy, 24 pp., 1970, (AD 879 590).

Akal, T., "The relationship between the physical properties of underwater sediments that affect bottom reflection," Marine Geology, 13, 251-266, 1972a.

Akal, T., The general geophysics and geology of the Strait of Sicily, in Oceanography of the Strait of Sicily, (T. D. Allan, T. Akal, R. Molcard, Eds.), Proceedings of a Conference held at SACLANTCEN, La Spezia, Italy, 11-12 April 1972, SACLANT ASW Res. Cen., Conf. Proc. 7, La Spezia, Italy, pp. 177-192, 1972b, (AD 750 753).

Akal, T., C. Gehin, B. Matteucci, and B. Tonarelli, "Measured and computed physical properties of sediment cores, Island of Elba zone," SACLANT ASW Res. Cen., Spec. Rpt. M-82, La Spezia, Italy, 69 pp., 1972.

Gehin, C., C. Bartolini, D. J. Stanley, P. Blavier, and B. Tonarelli, "Morphology and late quaternary fill of the western Alboran basin, Mediterranean Sea," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 201, La Spezia, Italy, 78 pp., 1971, (AD 742 464).

Hamilton, E. L., "Elastic properties of marine sediments," J. Geophys. Res., 76, 579-604, 1971a.

Hamilton, E. L., "Prediction of in-situ acoustic and elastic properties of marine sediments," Geophysics, 36, 266-284, 1971b.

Hamilton, E. L., "Compressional-wave attenuation in marine sediments," Geophysics, 37, 620-646, 1972.

Hastrup, O. F., "Reflection of plane waves from a solid multilayered damping bottom," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 50, La Spezia, Italy, 52 pp., 1966a, (AD 479 437).

Hastrup, O. F., "Distortion of bottom reflected pulses," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 51, La Spezia, Italy, 34 pp., 1966b, (AD 482 740).

Hastrup, O. F., "The influence of a low velocity layer on the reflectivity from the sea floor," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 61, La Spezia, Italy, 42 pp., 1966c, (AD 483 680).

Hastrup, O. F., "Impulse reponse of a layered bottom," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 85, La Spezia, Italy, 30 pp., 1967a, (AD 811 104).

Hastrup, O. F., and E. Schunk, "Numerical determination of experimental bottom reflection losses," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 104, La Spezia, Italy, 21 pp., 1967b, (AD 824 826).

Hastrup, O. F., "The reflectivity of the top layers in the Naples and Ajaccio abyssal plain," SACLANT ASW Res. Cen., Tech Rpt. 118, La Spezia, Italy, 42 pp., 1968, (AD 839 816).

Hastrup, O. F., "A detailed analysis of acoustic reflectivity in the Tyrrhenian abyssal plain," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 145, La Spezia, Italy, 61 pp., 1969a, (AD 854 842).

Hastrup, O. F., "The effect of periodic bottom layering on acoustic reflectivity," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 149, La Spezia, Italy, 30 pp., 1969b, (AD 856 029).

Hastrup, O. F., "Digital analysis of acoustic reflectivity in the Tyrrhenian abyssal plain," J. Acoust. Soc. Am., 47, 181-190, 1970.

Hovem, M. J., "Removing the effect of the bubble pulses when using explosive charges in underwater acoustic experiments," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 140, La Spezia, Italy, 25 pp., 1969, (AD 849 890).

Kermabon, A., P. Blavier, U. Cortis, and H. Delanze, "The sphincter corer: a wide-diameter corer with watertight core catcher," Marine Geology 4, 149-162, 1966.

Kermabon, A., and P. Blavier, "Principles and methods of core analysis at the SACLANT ASW Research Centre," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 71, La Spezia, Italy, 44 pp., 1967, (AD 818 754).

Kermabon, A., C. Gehin, P. Blavier, and B. Tonarelli, "Acoustic and other physical properties of deep sea sediments in the Tyrrhenian abyssal plain," SACLANT ASW Res. Cen., Tech. Rpt. 113, La Spezia, Italy, 47 pp., 1968, (AD 834 802).

Michelozzi, E., "Studio sui primi strati dei sedimenti marini recenti dell'Arcipelago Toscano," Unpublished thesis, University of Pisa, Inst. of Geology, 1973.