

第一章 海洋地质调查和深海钻探

云横九派浮黄鹤，浪拍天峰起白烟。
立马高山望远海，睥睨天下看方圆。
炼色的海洋，在我们面前汹涌，
如此壮丽、富饶 广阔无际 图 1-1)。
这里有席卷千里惊心动魄的云天醉浪。
我们抬起眼帘，望向天空，望向海洋，
地平线上涌起神奇的伟大力量。



图 1-1 广阔的海洋^[2]

在我国社会主义建设的实践中，由于保卫和建设海防、发展航运交通和沿海建设事业，以及开发海底资源的需要，近年来，海洋地质学在我国有了极其迅猛的发展。

地球表面约有 71% 为海洋所覆盖 陆地的面积仅占地球表面的 29%，还不足 1/3。而在过去的地史时代中，现今的大片陆地也曾不只一次地被海洋所覆盖。为了正确地掌握海相地层找矿的规律，查明现代海底有用矿产的分布和形成环境；为了正确地认识海陆变迁和海岸带的发展历史 以保证海底、海岸和港口工程建设 满足航海交通、渔捞、海底通信、潜水作业与军事上的需要；为了弄清与人民生活活动密切相关的海底地震发生的原因和规律，以及时做出破坏性地震和海啸的预报；为了保护海洋环境、防止底质污染等一系列的需要，海洋地质学的研究正日益受到人们的重视^[1]。

前苏联著名海洋地质学家 П. Л. 别兹鲁科夫教授指出：“海洋地质学不是一门分支地质科学（更不是地理科学），而是所有地质科学巨大部门的总和或综合体。”^[4]几乎所有的地质学科迟早都要向海底研究领域扩展和产生分支。

第一节 国际海洋地质调查历史^[1,2,161]

一、从史前到 18 世纪末——海洋地质知识累积时期

海洋地质学知识是在海洋生产实践和航海探险中开始逐渐累积的。这个时期又可分为两个阶段。

(1)古代阶段 从史前到 14 世纪)在中国 ,5 000 年前出现了独木舟 ,3 000 年前出现了木帆船。公元前 200 年至公元 100 年 中国沿海航线已经畅通 并开辟了通过朝鲜半岛到达日本

海，绕过中南半岛到达印度和斯里兰卡等航线。据记载，公元 12 世纪初中国人已把指南针应用于航海。由于航线的开辟和航海活动的发展促进了人们对海洋现象的认识。

古代海洋探险的重要贡献之一是证实了地球的形状。公元前 5 世纪，巴门尼德宣称地球是圆的。公元前 250 年左右，厄拉多塞尼计算出地球的圆周长为 39 690km 与地球的实际周长十分接近，并画出了地球的经纬线，提出了绕地球航海一周的想法。公元前 2 世纪中叶托勒密地图绘有海洋，他指出大西洋和印度洋同地中海一样，是闭合的大洋，并认为地球东西两点彼此十分接近，如果向西航行，则可以抵达东端。这一观念在 1 300 余年后，启发了哥伦布向西远航的设想。

(2)海洋地理考察阶段 从 15 世纪到 18 世纪末)在此时期 资本主义生产方式的兴起 自然科学和航海事业的发展，促进了海洋地质知识的积累。这时的海洋地质知识以远航探险等活动所记述的全部海陆分布和海洋自然地理概念为主。如 1405—1433 年中国明代郑和率领船队七下西洋，就是一次重大事件^[9]。公元 1405—1433 年（明成祖朱棣永乐三年至明宣宗朱瞻基宣德八年）(1405—1433 年)的近 30 年间，我国著名航海家郑和率领着庞大船队七下“西洋”（今南太平洋、印度洋一带）访问了亚、非两洲 40 多个国家，在我国航海史和对外关系上写下了光辉的篇章^[9]。郑和下西洋发生在明代初期国势比较强盛的时代，当时具有资本主义萌芽因素的矿冶、纺织、造船、瓷器等工业也获得进一步发展。正是由于具备了雄厚的经济实力，明成祖朱棣才能致力于恢复发展中国与海外诸国的关系，开展大规模的外交和外贸活动，从而有郑和下西洋之壮举。据《明史》记载 郑和下西洋“造大船 修四十四丈 广十八丈者六十二”。（郑和家谱》上则说：“宝船六十三号 大船长四十四丈 阔一十八丈 中船长三十七丈 阔一十五丈”。郑和每次远航，随行人员总数在二万七八千人之间。在近 30 年的时间里 郑和率领着一支雄伟的船队，经过南洋群岛，横渡印度洋，取道波斯湾，穿越红海，穿越赤道以南的非洲东部海岸及马达加斯加岛一带。郑和船队在太平洋和印度洋上航行的 30 年中 往返于汪洋无际波涛汹涌的大海上 对各地的路程远近、方向、海水深浅 大洋上的风云气候、海流、潮汐涨退 以及各海域的沙线水道、礁石隐现，停泊处所水的深浅和海底情况 ——是否有铁板沙、沉礁等 诸如此类，都要广集有关资料和十分熟悉，否则就无从在大海中远航^[9]。

总的来说 郑和七下西洋 屡经今越南南部、爪哇、苏门答腊、斯里兰卡、印度东北的孟加拉和以西波斯湾内的忽鲁谟斯、阿拉伯半岛西南红海入口的阿丹以及非洲东部沿赤道以北的一些国家，郑和船队在向非洲东部赤道以南沿海的航行中，曾发现马达加斯加岛，那里离好望角已经不远了。1487 年，一支葡萄牙舰队在巴托罗缪·迪亚士率领下，从红海南下到达马达加斯加岛对岸，发现“好望角”这比起郑和船队来说要晚 60 年。

2002 年 3 月 英国前海军军官加文·孟席斯 (Gavin Menzies) 提出了郑和最早发现美洲一说。孟席斯在自己的第一本书《1421 中国发现了世界》中提出 哥伦布没有发现美洲 麦哲伦不是第一个进行环球航行的人……富有传奇色彩的郑和带领中国船队早已先于他们到达了那些地方。据称(戴维·威尔逊, 2002 年 12 月 1 日),《1421 中国发现了世界》这本书是加文·孟席斯 15 年研究的结晶，在其妻子玛塞拉的支持下，孟席斯追踪了郑和船队在全球的航线。他访问了 120 个国家、900 余个博物馆和图书馆以及中世纪末期的各个主要港口，然后返回自己在伦敦北部伊斯灵顿家中写成。 2003 年德国《明镜》周刊 1 月 20 日一期也报道“那是 1421 年秋天，来自中国的水手驾驶着巨大的帆船，航行两万多海里，经过印度、非洲之角，抵达加勒比海。在经过长途航行之后，人们终于嗅到了陆地的味道。这一年的 11 月 26 日中午 中国皇帝的使者在瓜德罗普岛登陆。船队在这里补充了新鲜的淡水……”这些场景均援引自加文·孟席

斯的著作《1421：中国发现了世界》。笔者认为，有关郑和船队不但泛海印度洋，还绕过了好望角，横渡了大西洋，发现了美洲新大陆一说，其所有的“新证据”，尚须作全面严谨的考证与核实，再作切实评价。显然，这不是一个简单的问题。

15世纪下半叶开始，随着生产发展和人们实践活动范围的扩大，地球球形说为越来越多的人所接受。在当时历史条件的推动下，相信地球球形说的哥伦布打算向西寻找去印度和东方国家的最短航程，于是在1492年8月3日至1504年，意大利航海家哥伦布4次横渡大西洋，抵达了新大陆——北美洲。现在，哥伦布手指大海的雕像仍屹立在巴塞罗那海滩上，哥伦布就是从这里扬帆出海去为西班牙国王寻找印度的黄金和香料的。虽然他没有找到印度，但他率领船队3艘船只，104人横渡大西洋成功发现了北美洲。

1519—1522年，葡萄牙人麦哲伦在西班牙的支持下率领5艘帆船265人作环球航行。他们于1519年9月20日从西班牙出发，渡过大西洋，复沿巴西海岸南下，经南美拉普拉塔河口，绕过南美洲南端的海峡（后来称为麦哲伦海峡），复横渡太平洋，到达关岛和菲律宾海，在菲律宾群岛的马克坦岛上登陆时，麦哲伦因干涉岛上内讧，在一次战斗中被杀。此后探险队四分五裂，只有“维多利亚”号继续通过马六甲海峡进入印度洋，并一直保持向西航行的方向，再绕过非洲南端的好望角。于1522年9月7日，他们从东方驶回到大西洋而返回西班牙原港，历时3年之久，完成了绕航世界一周的壮举。这样，地球是球形的学说才得到举世一致的公认。人类只是在这个时候才真正地发现了地球。此外，1768—1779年英国J.库克在海洋探险中最早进行了科学考察，取得了第一批关于大洋海况、海深和珊瑚礁等材料。上述这些活动，不仅帮助人们弄清了地球的形状和地球上海陆分布的大体形势，而且直接推动了近代自然科学的发展。

二、从19世纪到20世纪50年代——海洋地质学建立和发展时期

这个时期，随着世界性的海洋考察活动日益增多，海洋地质学研究在深度和广度上都有较大发展。1873—1876年，英国“挑战者”号调查船环球航行明确以海洋科学考察为主要目的。这次调查历时3.5年，航程68900 n mile在太平洋、大西洋、印度洋和南极海域数百个站位进行了测深、取样，所获取的标本和调查资料经过20年的分析研究，最后写出调查报告50卷。人们称这次调查是近代海洋学的奠基性调查。“挑战者”号考察激起了各国海洋考察的热潮，如德国“羚羊”号（1874—1876年）、俄国“勇士”号（1886—1889年）均进行了环球考察。奥地利“极地”号（1890—1898年）在红海和地中海考察。美国“布莱克”号在加勒比海考察（1877—1886年）以及挪威F.南森的北极海域探险。

20世纪上半叶的两次世界大战之间（10年代末至50年代以前）综合性海洋考察普遍开展。在这个阶段，由于军事战略需要，海洋学研究以发展定量预报、海上通信和开发海洋战略资源为主要目的。1918年回声测深仪的发明和应用，标志着这一阶段的开始。这一新仪器的引入，人们发现了大量海底山脊、裂谷、深海扇和截顶锥，使人们对海底的认识几乎改观。例如，1925—1927年（其后又于1937—1938年）德国“流星”号（Meteor）考察船对南大西洋进行了历史两年零三个月的调查，它首次应用了回声测深仪，获得了7万个以上的海洋深度数据，首次清晰地揭示了大洋底部起伏不平的轮廓。1947—1948年瑞典“信天翁”号考察。这次调查被誉为近代海洋综合调查的典型，重点进行了大西洋、太平洋、印度洋赤道无风带的深海观测，以补充“挑战者”号调查的三桅调查船当时无法在无风带进行调查的空白。这次调查历时15个月，航程70000 n mile。它同时使用活塞式柱状采样器，可取长23m的岩心，发现深海沉积层中有第四纪气候变动旋回的记录；利用地层剖面仪调查了大洋沉积物的厚度；用放射性同位素测出沉积物的生成年代和沉积速率。此外，“信天翁”号调查在浊流、海底地壳热量测定等方面

也有所贡献。在此阶段,又如前苏联“勇士”号太平洋考察(1949—1958年),“勇士”号在考察中进行了测深,更正了远东近海和太平洋水深图,还发现了若干断裂带、海底山脉、海山等。它在马里亚纳海沟发现了世界最深的查林杰海渊深度达11034m,在千岛—勘察加海沟发现了深海渊10382m)。在考察中取得了40m长的海底柱状样品,分析研究了长达1000万年的地质历史。在这个历史阶段,海洋文献中常提到的大洋调查还有美国“卡那基”号(从1909年到1931年间断进行达20余年的调查)、“鸚鵡螺”号、“贝尔德”号、“地平线”号、“莫德”号(挪威)、德国“高斯”号、丹麦的“台挪-I”号和“台挪-II”号(1921—1935年间断进行达15年的调查)、1950年丹麦的“加拉蒂”号调查、法国“法兰西人”号和“帕斯”号、英国“发现-I”号和“发现-II”号、“斯科列斯比”号、“挑战者-8”号等。在一系列考察的基础上,获取了许多重要成果。例如,摩纳哥阿尔贝大公一世的“大洋水深图”(1904)、A.L.魏格纳的“大陆漂移说”(1912)、A.霍姆斯的“地幔对流说”(1929)、W.H.尤因首次进行海洋地震测量(1935)的成果、F.P.谢帕德的“海底地质学”(1948)、斯韦尔德鲁普等人撰写的巨著《海洋》等。

三、20世纪50年代以来——现代海洋地质科学时期

20世纪50年代以后,国际海洋地质调查研究工作进入了一个全新的历史时期。1957年国际科学联合会理事会下属的海洋研究科学委员会(SCOR)和1960年联合国教科文组织的政府间海洋学委员会(IOC)以及有关机构,先后组织了一系列宏大的国际联合考察计划。例如1955年由美国加利福尼亚大学斯克里斯普斯海洋研究所发起的“北太平洋联合调查计划”(NORPAC,有美、日、苏、加等国家的10余艘调查船参加)、“国际地球物理年考察计划”(IGY,1957—1958年)和1959—1962年的“国际地球物理合作”(IGC)联合海洋调查(参加联合海洋调查的国家多达17个,调查船达70艘以上)、“国际印度洋考察计划”(IIOE,1960—1974年,由联合国教科文组织发起,有13个国家的36艘调查船参加)、“国际海洋考察十年计划”(IDOE,1971—1981年)、“莫霍计划”(Mohole,1959—1961年)、“上地幔计划”(1964—1971年)、“地球动力学计划”(GDP,1972—1977年)、“深海钻探计划”(DSDP,1968—1983年)和“大洋钻探计划”(ODP,1985年至现在)研究产生洋盆地质过程的“FAMOU计划”以及在20世纪80年代开展的“国际固体地球科学研究计划”等。通过一系列宏大的国际联合探测计划的实施活动,人们对海洋地质特征及其演化过程有了更深入的认识。如在上述计划当中,“国际海洋考察十年计划”可以说是海洋研究历史中的里程碑,此计划有力地推动了海洋科学从描述性的工作向实验性和理论性研究的转变。IDOE的许多地质工作致力于更好地认识地球岩石圈板块扩张中心、大陆边缘和深海处的地质过程,特别注意研究矿物的富集过程,因为有远景的铁矿是板块扩张中心处生成新洋壳的作用所造成的。大陆边缘也是矿床的所在处,许多海底矿产都发现于大陆边缘处,特别是从海洋中取出来的石油、天然气和硫都多产自该区。IDOE期间,人们研究了大西洋大陆边缘,旨在发现非洲是怎样及何时与南美洲分离的,以便确定大陆边缘及邻近深海底后来的历史与发展,并探索出经济矿床来。沿非洲南部和南美边缘的重、磁探测研究改善了两个大陆在扩张前的接合程度,得到一幅大西洋张开早期的合理图像,得出张开约发生在1.5亿年前的结论。IDOE期间通过“SEATAR”计划人们也研究了板块活动边缘,并通过“锰结核计划”对北赤道太平洋结核作了研究。发现该区以大量富铜和富镍结核沉积为特征,结核及其内部的结核是原生动物造成的,这种发现再次强调了认识生物营力作用对深海结核生长的重要性;沉积后的再结晶作用破坏了这些有机体,造成富铜、富镍的矿物;生物性软泥中沉积孔隙水的研究表明,孔隙水中的锰和铜比底部水中的浓度富集10~25倍。IDOE期间通过“CLIMAP”计划,研究了造成大气与大洋中气候尺度主要变化的物理机制。

为了揭示冰期的地质记录，分析了深海沉积物。研究含有生活在表层水中的生物残体的沉积物是特别有价值的，这些洋底生物性沉积物以比较稳定和连续的速率进行堆积，在整个大洋范围内几十万年无间断。从这些生物残体可以推出有关表层水的温度、环流型式和底层水的化学性质，某种程度上可以推论出海冰的分布状况。早期的“CLIMAP”计划着重研究 1.8 万年前地球最后一次冰期时的大洋环流及其与大气的对应现象（counterpart）。大洋环流模式可作为推导全球大气模式的基础，这些模式有可能推出冰期的气候，并将之与今天的气候作对比。研究表明，地球最后一次冰期的平均气温比现在仅冷了 5℃，这种对近百万年中发生的最大气候变化幅度的估算提供了评价未来气候任何变化效应的基础。

20 世纪 50 年代以来——现代海洋地质科学时期。在这个全新的历史时期所展开的一系列宏大的国际联合考察计划当中，应当着重指出的是，在 20 世纪 60 年代中期国际上所开始的一项全球性大洋钻探计划。这项计划旨在洋底和深海区进行钻探，通过获得的海底岩心样品和井下测量资料来研究海洋底部洋壳组成、结构、成因、历史及其与大陆的关系，并揭示海洋沉积物的性质及其形成历史，探索地磁起源及地磁场极向倒转的原因、论证板块构造理论等。1957 年，在多伦多召开的国际大地测量及地球物理联合会大会上，美国 W.H. 蒙克、H.H. 赫斯曾提出莫霍计划（Project Mohole），试图钻穿洋壳最薄处，获取地壳深部和地幔物质样品。该项计划于 1961 年 3 月 28 日在美国加利福尼亚湾外试钻，接着在墨西哥岸外水深 3 560m 处海底只钻了 170m 的第三纪地层后 钻到了坚硬的玄武岩 钻头急速磨损 由于钻探船“卡斯 - I”号没有动力定位和重返井孔等先进的技术设备，无法更换磨损的钻头，使作业中断，未能钻达莫霍面。1964 年 5 月，为进一步解决深海钻探问题，由美国 Scripps Institution of Oceanography, Uni. of California, San Diego）、拉蒙特地质观测所 Lamont - Doherty Geological Observatory, Columbia University）、迈阿密大学海洋与大气学院（Resensiel School of Marine and Atmospheric Science, Uni. of Miami）、伍兹霍尔海洋研究所 Woods Hole Oceanographic Institution）等 4 个单位联合发起组成“地球深层取样联合海洋机构”（JOIDES, Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling）并提出了“深海钻探计划”（Deep Sea Drilling Project, DSDP）。“深海钻探计划”是海洋科学的一项登峰造极的成就。“深海钻探计划”以浅层取样 仅钻取洋底玄武岩层以上的沉积层 为目的。

JOIDES 的成员在 1968 年增加了华盛顿大学海洋系（Department of Oceanography, University of Washington）、1975 年增加了夏威夷大学地球物理所（Hawaii Institute of Geophysics, University of Hawaii）、俄勒冈州立大学海洋学院 School of Oceanography, University of Oregon）、罗德岛大学海洋学研究生院 Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island）以及得克萨斯农工大学海洋系等。担负深海钻探任务的是“格洛玛·挑战者”号（Glomar Challenger）深海钻探船。此船总吨位为 10 500t 船员 45 人 有卫星导航和动力定位设备 能在风速 9 级（20.8~24.4m/s）表层海流流速 3kn（3 n mile/h）的情况下保持原有船位。船只可在任何水深 不用抛锚 而由船载电子计算机自动调节船位，能在 6 100m 水深处钻进海底面以下 1 500m。1965 年开始进行深海钻探试验，钻探试验选择在美国东岸外海的布莱克海台处。1968 年 7 月 20 日，“格洛玛·挑战者”号离开美国得克萨斯的橘港，首航墨西哥湾。

“深海钻探计划”（DSDP）又称 JOIDES 计划，是美国国家科学基金委员会 NSF 的“大洋沉积物取心计划”的一部分。“深海钻探计划”开始后 它用 5 年半的时间 完成了 3 期钻探计划。由于该计划成果显著，俄国科学院、前联邦德国地球科学与矿产调查所（Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe）、英国自然环境研究委员会（Natural Environmental Research Council）、法国

全国大洋考察中心 (Centre National Pour l'Exploration Des Océans)、加拿大欧洲科学基金会 (European Science Foundation Consor) 以及日本东京大学海洋研究所等相继加入 JOIDES 于是 深海钻探计划进入国际合作新时代,即进入“大洋钻探国际协作”阶段 (IPOD) 又称“国际大洋钻探计划”实际上是上述深海钻探计划的继续 是深海钻探计划的第四阶段。IPOD 继续沿用深海钻探计划的航次编号 即 IPOD 就从 1975 年的第 45 航次开始深海钻探。IPOD 使深海钻探工作向更广阔、更深入的方向发展 重点研究洋壳的组成、结构和演化。DSDP 以覆盖在大洋底坚硬的玄武岩上面的松软的、半固结的沉积物为主要研究对象 而 IPOD 则主要企图钻透坚硬的玄武岩,到达玄武岩以下的层位,尽可能深地钻进海洋地壳。过去 DSDP 的经费完全由美国国家科学基金会提供 而 IPOD 每年用于深海钻探的费用约 1 000 万美元以上 由英、法、日、德、俄五国每年各负担 100 万美元 另外 500 万美元由美国承担。“格洛玛·挑战者”号开展了大量富有成效的工作 从 1968 年 8 月 11 日开始至 1983 年 11 月期间 共完成了 96 个航次 航程超过 60 万 km 先后在 624 个钻位钻了 1 092 个钻孔 遍及除北冰洋以外的全球各大洋 其成果按每航次编成《深海钻探计划初步报告》至 1985 年已出版 80 余卷 总字数达 7 000 万字。通过深海钻探 直接钻取了大量洋底沉积层和玄武岩样品 提供了各主要大洋盆地的年代、洋底结构、组成、矿产资源、大洋沉积等方面的丰富资料 并对洋盆的形成和演化史作了总结性概括 成为现代海洋地质科学发展的一项壮举。深海钻探计划具体验证了海底扩张和板块构造学说,推算出大西洋扩张速率超过 2.54cm/a 。从赤道地区钻井所取得的沉积岩心表明,太平洋底有向北运动的迹象。钻探资料也表明,红海两岸目前仍在以其中央海槽为扩张轴向两边扩张,近 2.4Ma 来每侧的扩张速度为 0.9cm/a 深海钻探证实,目前的各大洋是原始的超大陆经海底扩张破裂后形成的。深海钻探还证实 所有大洋盆地沉积物的地质年龄 最老的大洋底的岩石是 170Ma 即不到地球年龄的 $1/20$ 。它证实了诸如“地中海变干”、“白垩纪末生物绝灭”等地质历史上的偶然事件 阐明了洋底玄武岩的性质 表明洋壳的层 2 主要由拉斑玄武岩组成),并为古海洋学的建立奠定了基础,揭示了近 200Ma 来古海洋的演变史。概言之,深海钻探对于包括地幔对流、海底扩张、板块构造的全新的地球科学理论体系,对于长周期的全球气候变化规律的解释等都起了巨大的作用。所以,它是当代地球科学和海洋科学的前沿阵地,是当代自然科学史上划时代的事件,它在深化人类对于生命、海洋、地球等一系列重大科学问题的认识方面 已经产生了并且将继续产生深远的影响。

“格洛玛·挑战者”号在完成了它的第 976 航次之后 于 1983 年 11 月正式退役。接替它工作的是另一艘更加壮观、更加先进的“决心”号 (RESOLUTION) (其注册名称为 SEDCO/BP471) 现在又称之为“乔迪斯决心”号 JOIDES RESOLUTION 的钻探船 该船可在 8 000m 余深的海域作业。“决心”号于 1985 年元旦从美国佛罗里达州出发开始它的处女航,启动“大洋钻探计划”(ODP)。“决心”号是当代最先进的科学钻探船 船体长达 143.3m 宽 21.3m 钻塔高出水面 61m,排水量 16 870t 它装备有计算机控制的大功率动力定位系统 能够使船只保持固定位置 并准确地钻达 8 230m 的水下目标。重 400t 的补偿器能够使钻具和大洋底保持稳定的相对位置。船上的计算机系统可以通过卫星导航,能进行各种数据的收集和处理以及绘图等,并且可以通过卫星同地面计算机站衔接 从而获得其他资料。“决心”号是一艘巨型的海上科学研究中心 它拥有高 7 层、总面积达 $1\ 115\text{m}^2$ 的现代实验室群 包括沉积学、古生物学、岩石学、地球化学、古地磁学、地球物理等各学科的实验室,并且还装备有电脑打字室和照相室。船上图书馆收藏有全套的 DSDP 初步报告、图件以及其他有关海洋地质科学的重要文献。“决心”号共有 65 名船员 它可以同时容纳 50 名科学家和技术人员 2 倍于“挑战者”号 进行各类科学活动。

由“决心”号继“格洛玛·挑战者”号之后而展开的“大洋钻探计划”(ODP, 1985 年至今)取得了

具有巨大科学价值的科学成果，它已经成为自然科学国际合作中最宏伟、最成功和最出色的项目之一。它在科学史上的地位，将和太空探索、月球取样等一起载入光辉的人类史册。

人类未来的深海钻探将朝向古气候、古环境、古地球化学、古海洋与地壳演化之间关系方面发展。要达到这一目标，深海钻探还必须向更深处钻进（钻透洋壳层Ⅱ和层Ⅲ甚至到达上地幔与岩石圈板块的界面），才有可能进一步直接地研究洋壳深部的作用过程——包括洋底岩石圈的深部结构、软流圈的状态和驱动岩石圈板块的动力机制等各种悬而未决的重大问题。随着深海钻探向“古”和“深”发展和海洋地质科学研究的不断深入，洋壳的奥秘必将被揭示。

为了进一步研究大陆与大洋岩石圈的结构与成分，阐明地壳、上地幔的现状、起源、演化与动力学状态，在20世纪80年代开展的规模宏大的“国际固体地球科学研究计划”也是一项人类科学史上的重要事件。此项计划内容相当广泛，主要包括有12项：①岩石圈构造应力；②岩石圈的抬升与沉降；③板块边缘或构造活动区的应变积累和应力释放；④板块运动及其内部构造应变；

⑤岩浆的生成、侵入和喷出；⑥地球内部过程；⑦中生代—新生代古地理和古气候；⑧前中生代构造；⑨岩石圈和软流圈的构造与成分；⑩大洋岩石圈和海—陆过渡带的形成与演化；⑪大陆岩石圈的形成与演化；⑫北极地球动力学。通过“国际固体地球科学研究计划”的全面实施，进一步推进和加深了人们对地球与海洋演化过程的理解。

第二节 高分辨率海洋地球物理调查^[5,6]

随着海洋资源勘探与开发的发展，高分辨率海洋地球物理调查在近海现场调查中起着越来越重要的作用，这是因为它能提供海底及海底下自然状态的基本信息。在某种意义上，它是一种间接的现场测试手段。高分辨率海洋地球物理勘测与区域地质、土质取样、钻井取心和原位测试等调查方法相结合，构成一个综合的近海现场调查系列（图1-2），可以提供有关海底浅层地质与土工条件或参数，是选择海上石油钻井的数量与最佳位置、锚地选址所必须考虑的因素，是设计、布置与构筑海洋石油平台、输油管线及海底动力电缆敷设和其他海洋工程设施作业过程所必须参考的依据。

我们知道，海洋石油勘探开发的工程设施都是建立在海底土层上的，为保障这些结构的安全性和经济性，必须对海域沉积层的工程地质和土性条件进行充分地调查与评价。在选用一座海洋石油平台和将它启运到场地之前，为了防止地基基础失事引起的事故，必须采用足够的勘查技术和资料，以查明场地地层条件和有关的海底环境情况，它包括：①区域性的地质和岩土工程勘查；②高分辨率地球物理调查；③场地的地质和岩土工程勘查。其中，所谓高分辨率海洋地球物理调查这个术语，仅仅是与常规的海洋地球物理调查相对而言的。例如，高分辨率海洋地震调查与常规的用于油气勘测的人工地震勘测不同，常规的人工地震勘测系统使用的频率范围一般在10~100Hz之间，其发射的声能较高、穿透力达几千米以上深度。而高分辨率人工地震系统显示深地震技术系统所不能探测的小尺度地质细节。与深地震系统相比，高分辨率地震系统以可发射小声能而使用较高的频率（多在100~500Hz范围）、更快的发射率和较短持续时间的输出脉冲为特征。然而，高分辨率地震系统声能穿透海底以下的深度相对较小，其穿透力一般局限于海底下1200m的深度范围内。

高分辨率海洋地球物理调查要求导航精度高、测线间距密和记录质量好。通过高分辨率地球物理调查有关记录，可直接识别出水深、海底形态和障碍物、海底沉积层厚度与结构、浅层断裂、含气沉积物和油气苗等地质现象。

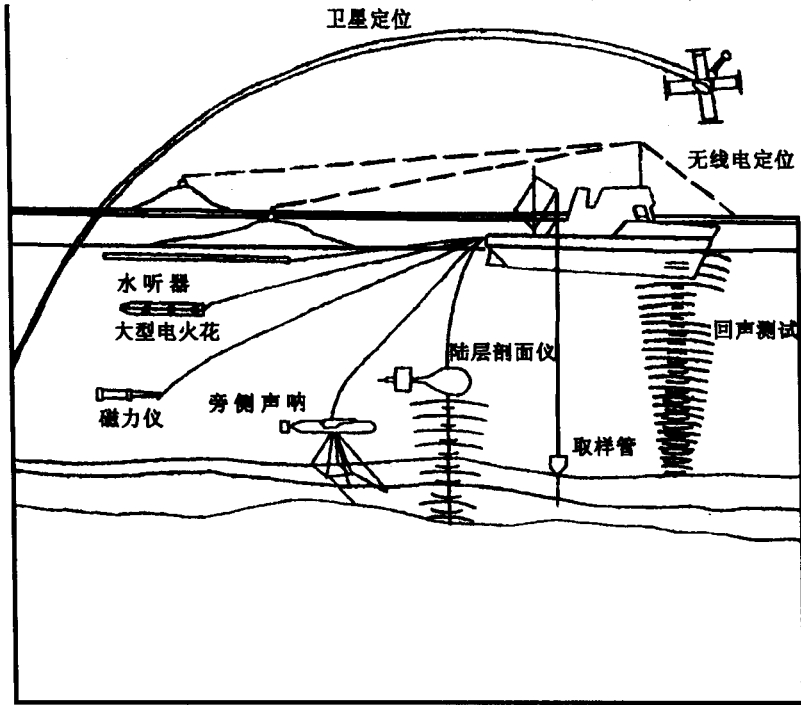


图 1-2 综合近海现场调查系统^[5]

范时清、赖小嘉、吕成富曾联合著文“高分辨率海洋地球物理勘测”^[5]系统阐述了这个问题。

一、海底地形调查

一般采用精密回声测深仪在航行中连续记录与测量海底地形。为了产生一张描绘海底地形的等深线图 需要布设许多条平行测线 测线间距由该图的比例尺即所要求的细致程度来决定。

此外 有一种高级数据收集系统 称“海洋声束系统”(sea beam),它是一种先进的多声束回声测深仪,此系统能发射扇形声脉冲,它可沿测线得到一条带状水深资料。这些水深数值经过微处理机计算处理后,可在船上直接自动描绘成等深图。也可作水深剖面图像显示(CRT显示)。这些资料也可记录在磁带上作进步处理。

二、侧扫声呐调查

侧扫声呐是一种专用于显示海底地形和海底物体二维图像的声学探测系统,它用高频声束并用双道记录器来产生与绘制海底的声图片或“声呐图谱”,对海底地形作快速的定量研究。它可分辨海底高度为 0.3m 或更小的物体,可探测和显示不规则的海底地形或障碍物细节,如块石、碎石堆、珊瑚露头、坠落的飞机、沉船、鱼雷、海底管道和低洼地区。一些水下地形特征:如沙波、泥流、断层崖等 也能由侧扫声呐扫描出来(图 1-3 图 1-4)。

在侧扫声呐技术基础上,采用微信息处理,人们研制出全新的“SMS 960 海床自动测绘系统”(SMS 960 SYSTEM)。此系统可提供和自动展示一个海床地貌平面图,提供整个探测区域海底完整视觉图表。它可将测区海底地貌形迹、海底输油管线等所有海底的东西以正确的尺寸和形状完整地透视并显示出来。

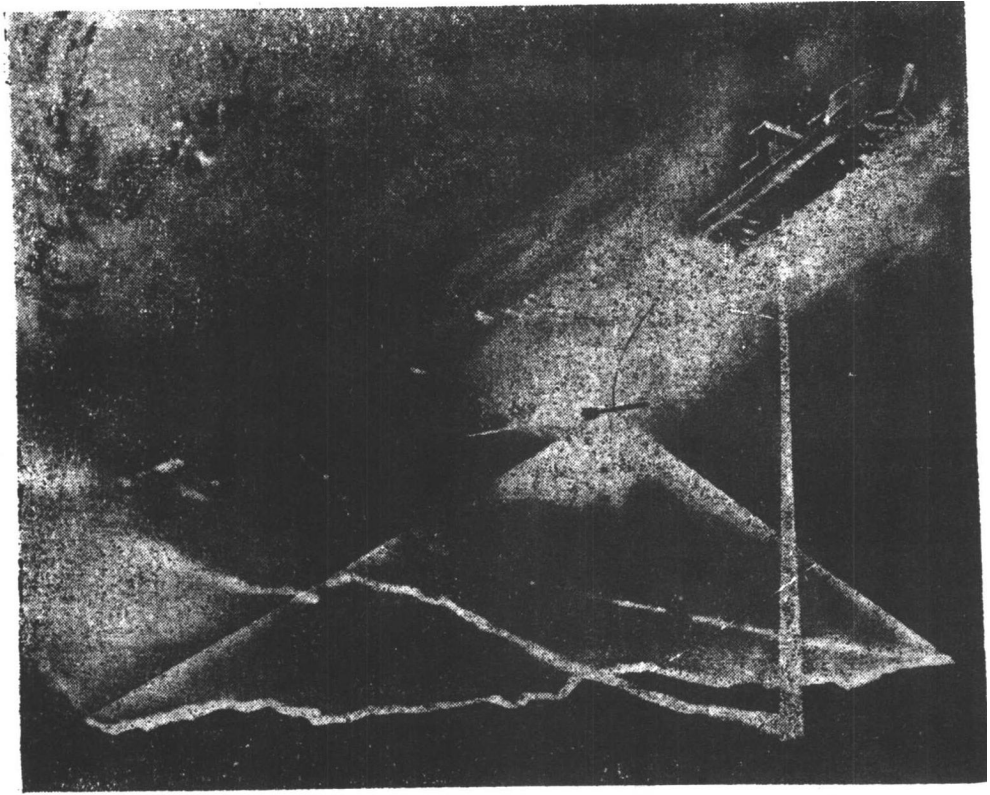


图 1-3 侧扫声呐工作示意图^[5]

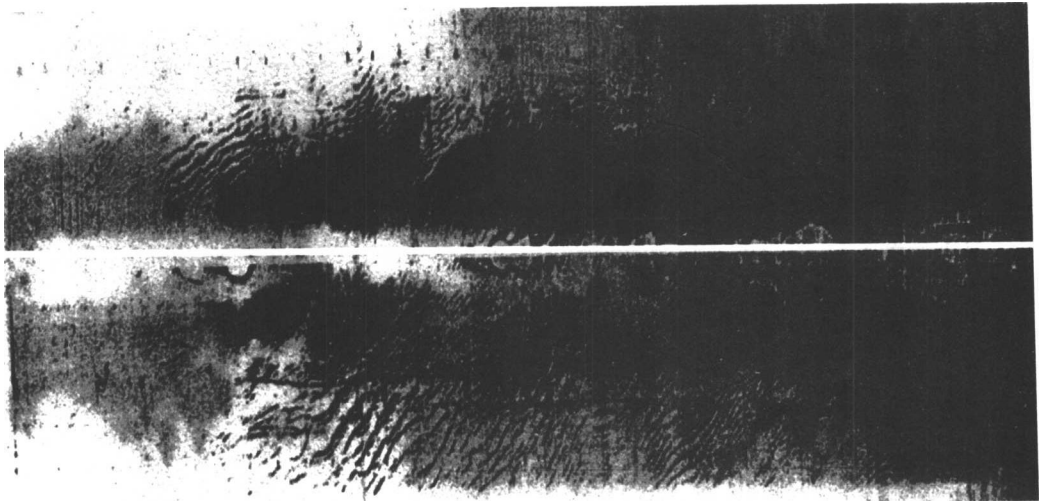


图 1-4 侧扫声呐图谱^[5]

表 1-1 近海地质现象、其潜在的工程意义和探测时所需用的高分辨率海洋地球物理方法^[5]

现象	特征描述	分布或存在地区	成因	潜在的工程意义	适用的高分辨率地球物理系统	注释
物质运动	包括 30km 余长、150m 厚的滑坡；覆盖几十平方千米的泥流沉积；厚度达 60m 以上的局部滑动沉积；起伏有蠕动而沉积重叠的扩散斜坡区	一般沿大陆坡上部、三角洲前缘以及在相对陡峭的斜坡上的沉积有软沉积物的地区	起因于重力作用，但是，快速沉积或隆起、地震和风暴潮也能形成	可能造成基础结构和管道横向负载的支撑变小和异常	在多数情况下，可以使用所有的声学系统	大陆坡上部的多数滑坡沉积推断为晚更新世
表面或浅部断层	长度范围从几十千米，并且可能在海底下几十米深处伸展到几百米深处	一般在像大三角洲等快速沉积区、底辟和构造活动区	可能与区域构造、软沉积物的底辟作用和重力形变有关	可能造成基础结构的差异位移；沿构造断层可能发生地震和突然的断裂	声波脉冲和电火花；如果断层在海底有清楚的显示，还可以使用侧扫声呐、重力仪	一般仅指局限于海底下 600m 以内的断层
浅层天然气	沿着断层面或构造顶部集中出现，或不均匀地弥散于沉积物中	一般在近海的三角洲沉积中和聚集层埋深较浅的地区	由腐败的有机质原地产生，或向上运移到现有的深度	在异常压力下，可以引起取样和勘探钻井的井喷；能显著地降低含气沉积物的切变强度	声波脉冲和电火花	一般仅指海底下 600m 以内的天然气
沉积物运移	包括障碍物附近的沉积物的局部移动以及在扩散区由脉动、沙丘和沙波运移形成的沉积搬运，有些地方沙波痕高达十几米	一般在高速潮流区后果最严重	由潮汐、风暴潮和正常海流造成的	冲刷和不规则沉积可能造成基础结构和管道负载的变化	浅层剖面仪、声波脉冲和侧扫声呐	仅指由潮流引起沉积物的再悬浮，沉积物运移一般由砂组成
甚硬海底	具有高切变强度，地震信号的穿透力变小或无效	无固定的分布地区	冰碛物、珊瑚礁、岩盐、火山产物和其他岩石或超固结沉积物	能造成锚锭、打桩和升举式钻机支柱安置的困难	浅层剖面仪，声波脉冲	

续表

现象	特征描述	分布或存在地区	成因	潜在的工程意义	适用的高分辨率地球物理系统	注释
甚软海底	切变强度很小, 低达 0.01 t/ft^2 ($1 \text{ ft}^2 = 0.0929 \text{ m}^2$), 在地震记录上好像是一组“透明”的反射	一般出现在现代三角洲或残留三角洲的中央附近区以及细粒沉积物的堆积区	固结不足的淤泥和黏土	能造成锚碇和升举式钻机使用的困难或事故	浅层剖面仪, 声波脉冲	
相对陡峭	在一些地区, 斜坡坡度高达 25° , 而“相对陡峭”的斜坡坡度可低至 1°	大陆坡、海底峡谷、构造活动区和其他局部地区	不定	可以造成事故, 妨碍使用重力式生产结构	浅层剖面仪, 声波脉冲, 电火花	
局部粗糙和底部不规则	局部地势起伏高达十几米, 但一般小于 3 m	常伴生于坚硬海底或气体从海底大量逸出的地区	漂砾、冰碛物、珊瑚礁等障碍物, 出露的岩盐、火山、山丘、断层崖等	可能造成锚碇和安置水准面的困难, 妨碍使用重力式生产结构	浅层剖面仪, 声波脉冲和侧扫声呐	可能伴有滑坡滑动和泥流沉积
局部注陷海底	一般直径为十几米到上百米, 深达十几米	不定, 但在下伏有含气沉积的地区最常见	有天然气和水排出	注陷内或其下的沉积具有异常低或高的强度	浅层剖面仪, 声波脉冲和侧扫声呐	不包括与滑坡滑动、泥流沉积或冰川沉积相伴生的注陷
古河床	古河床本身有几米到几十米深, 上百米宽, 至少有几千米长	一般见于更新世低海平面期间暴露的大陆架地区	流经暴露的大陆架的河流, 也包括水下河道	古河床内的沉积物强度与其周围的沉积物明显不同, 并且在水平 and 垂直方向上急剧变化	重力仪、浅层剖面仪和声波脉冲	
人工物	不定	不定	沉船、管道、电缆、炸弹等	能妨碍管道敷设、锚碇、打桩和升举式钻机的安置	磁力仪和侧扫声呐	

三、海底磁力探查

利用海洋磁力仪可测出海底局部地磁场强度的变化，这种对磁异常的灵敏性可用于确定海底下和海底表面附近的输油管、沉船和其他铁磁性物体的位置。

磁力仪系统基本上由拖在近海底的探头和船上的图形记录器组成。通常，记录器上磁场总强度的记录线是相对平滑的，表示在环境背景噪声上，场强无急剧变化。当探头接近铁磁性物体时，场强发生显著变化，平滑的记录线变成陡峭的峰或谷（图 1-5）。单个磁异常的幅度和形状取决于引起异常物体的大小、成分、方向以及它与探头的距离。典型的磁异常幅度由数伽马

（1 伽马 = $\frac{10^{-2}}{4\pi}$ A/m）到数十伽马以上，背景噪声一般为 3 伽马。

四、海底浅地层剖面测量

利用高分辨率地层剖面仪系统可以走航探测海底沉积物分层结构状况（厚度、层序及岩相特点），可获得连续的海底地层剖面记录。海底浅地层剖面仪的类型如有 230 UNIBOOM、240 UNIBOOM 以及电火花剖面仪系统。

此外，还有一类地层剖面仪叫做“地质脉冲高分辨率海底剖面仪”（GEOPULSE）其分辨率可达几十厘米，穿透力达海底以下 100~150m。“地质脉冲系统”是一个中功率的声源。

在此系统中，实践表明，采用电火花震源具有较宽的频谱，是一种比较理想的浅层高分辨率勘探震源。

五、高分辨率多道数字地震测量

根据高分辨率地震声学勘测（浅地层剖面测量、多道数字地震测量）资料，可圈定或识别出若干海底地质现象，如海底沉积层结构及其类型、不稳定沉积体、海底大规模滑坡、移位、海底隆起、底辟、断阶……特别是可探测可能构成钻井危险的浅层天然气储集带。这些资料对海洋石油开发基础工程以及对了解与评定场地的海底稳定性和沉积环境状况等提供有用的（虽然是间接的）情报。

高分辨率地球物理调查与场地土质取样、钻井取心和原位测试等方法相结合，构成一个综合的近海工程现场调查系列，可以提供有关海底浅层地质条件和土工条件的资料；可对海洋自升式石油钻架基脚贯入深度与基脚荷载的关系做出定量指导；可给选择海上石油钻井的数量与最佳位置、锚地选址、构筑海洋石油平台、输油管线及海底动力电缆敷设和其他海洋工程设施作业提供必要的参数，为估计钻井和水下建筑的潜在危险以及土工学的基础设计提供重要依据。

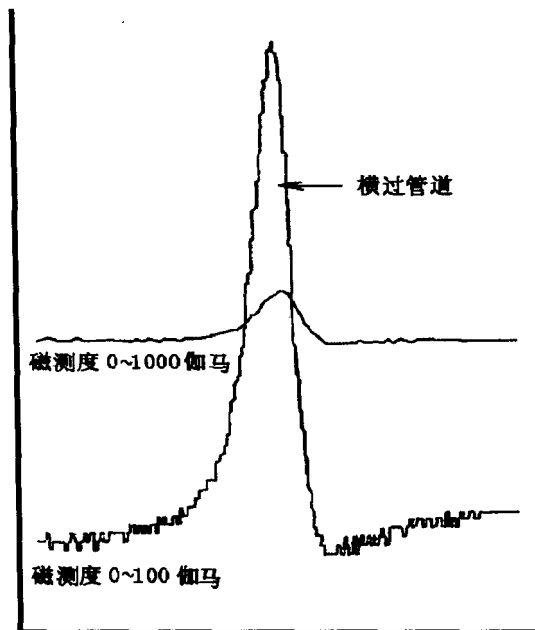


图 1-5 海洋磁测记录（横过海底管道）^[5]

第三节 若干海底地质现象的地震识别^[5]

根据高分辨率地震探测资料，可圈定或识别出若干海底地质现象，如海底沉积层结构及其类型、海底大规模滑坡、移位、海成隆起、断错、浅层气等。根据这些地质现象，可评定现代海底的稳定性，而对海底稳定性的评价是近海石油开发区工程地质调查一项重要内容^[5]。

一、海底沉积层分层结构及其类型^[5]

高分辨率地震声学剖面就是海底下方的 X 光照相，它不仅可提供沉积层结构状况，而且可提供有关沉积环境、沉积过程及特征方面的信息。

从反射的连续性来看，把一反射面与某一地质年代或者岩相界线相比是可以的。也可以借助钻井资料来确定层序年代，在没有钻井资料的情况下，可直接通过地震剖面上边缘地区“上超”或“顶超”模式的确定来重建海平面的变化曲线，并把这一曲线与一些标准曲线相比较的方法来确定层序年代。在没有钻井资料的情况下，根据海平面相对运动和海平面升降周期的变化可直接预测沉积层地质年代。

二、海底滑坡 (submarine landslide)^[5]

这种海底地质现象在形态上和成因上都是多种多样的。不同海底物质、不同环境、不同负载会造成不同的海底滑坡。当海底沉积物剪切强度减少或应力增加（或两者同时起作用）超过了破坏极限时，就会导致海底滑坡发生。

在地震剖面上识别海底滑坡的主要准则是：一层或一组地层断错和运动的迹象；地层的旋转和改向；地层缺乏内部结构；缓倾破裂面的存在等。

海底滑坡是引起海洋石油井架倒塌的重要原因，它的危害性甚大。在海底构筑石油平台时，认识滑坡的触发机制和这种危险性的征兆是十分重要的。

三、不稳定沉积体

不稳定沉积体常与较大的滑坡带相伴生。在横穿不稳定沉积体的人工地震剖面上（图 1-6），可以看到覆盖在陡坡 78° 上的易崩滑的未固结沉积层序或表现出挠折或呈现出隆起的特征。虽然其中已有崩滑形迹，但却看不出经过较长距离的搬运。尽管内部反射层似乎稍有

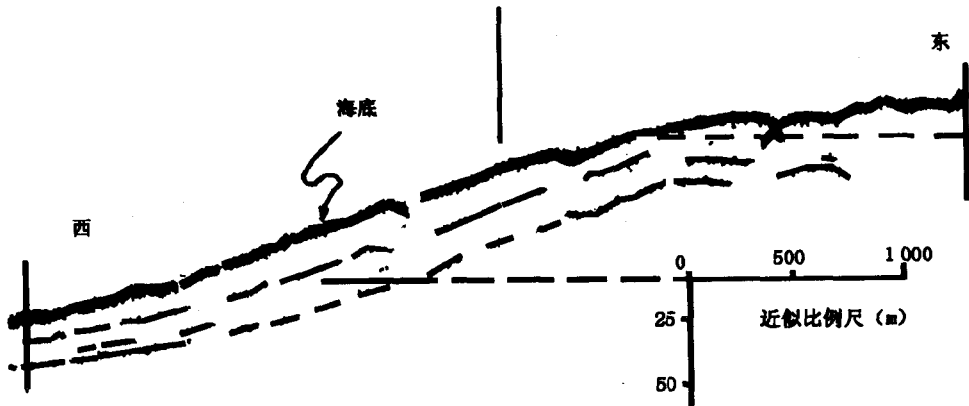


图 1-6 不稳定沉积体^[5]

旋转和变形，但主要滑坡面并不明显，且表面常呈丘形。看来这些沉积单元似乎正在经历顺坡运动，或许在不久的将来会以块体滑坡的形式破裂。

四、底辟^[5]

现代河口砂快速堆积在致密程度较差的三角洲和海洋黏土之上，结果造成差异负荷，黏土被挤出来，向上刺穿侵入上覆物体中，形成底辟。其在地震剖面上的特征是呈海脊或圆丘状。它的标志为底辟在成层良好的沉积物覆盖的地方，最年轻的沉积物（顶部反射层）向上隆起。此外，有些底辟无沉积物覆盖，而直接露出海面，其上覆沉积物可能随底辟隆起过程被剥蚀了。底辟的深部运动可使上面的表层沉积物局部发生形变与裂开，并产生小的错位，这些变动可能会剪切油井或使油井桩脚倾斜（图 1-7）。



图 1-7 底辟^[5]

五、泥流沉积体^[5]

泥流沉积体的声学特征呈现为杂乱无定形的反射波。在有些地方可辨认出内部混乱的反射波至，说明层理是极其散乱和破碎的。可是，在大多数情况下，泥流沉积体中缺少反射层。此外，泥流沉积体的表面混乱而不规则，有较浅的洼地、气或泥的喷出口和扭曲的表面构造，这在侧扫声呐记录上也很明显（图 1-8）。

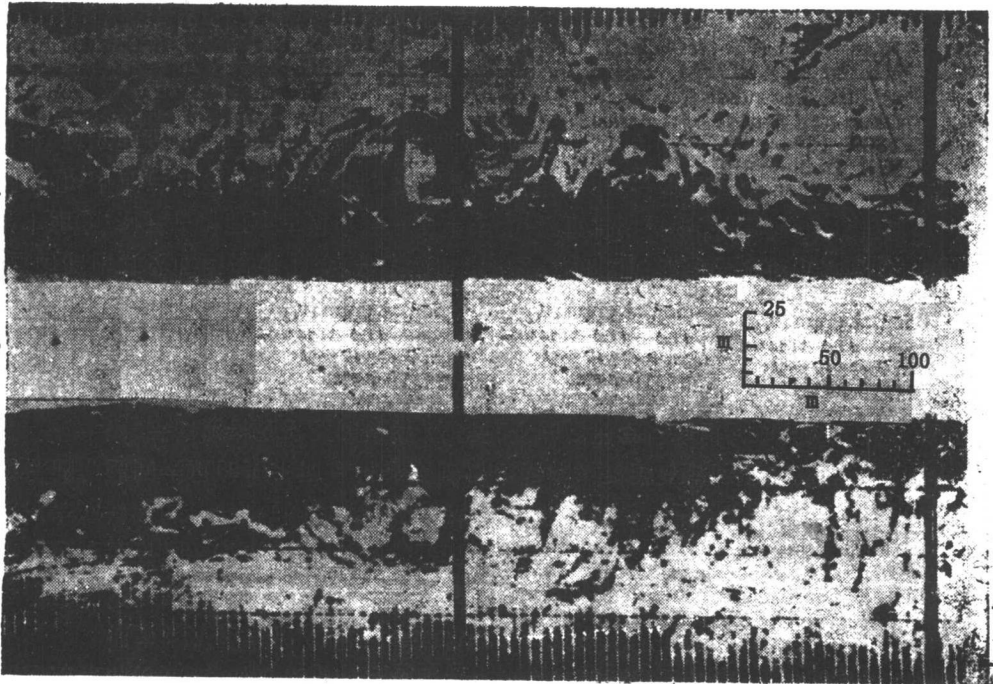


图 1-8 侧扫声呐记录到的泥流沉积体^[5]

六、浅层气集聚

浅海沉积中的天然气可来源于热成因或生物成因的生气物质。天然气集聚会降低母体沉积物强度，增强未固结沉积物发生崩滑或液化崩塌的可能性。石化和未石化沉积物中的天然

气集聚，可根据高分辨率地震记录上具有下列特征的一个或几个组合来识别，这些特征包括：浅层反射的不规则移位；使声波反射延迟到达的“压低”或速度降低；浅层反射完全屏蔽，水柱中的气泡显示等。当然，根据地震反射技术来鉴别浅层气集聚是不太可靠的，它需要直接测量沉积岩心的天然气含量来验证解释。然而，对于指出可能含气区的位置和范围来说，地震反射资料是很有用的(图 1-9)。

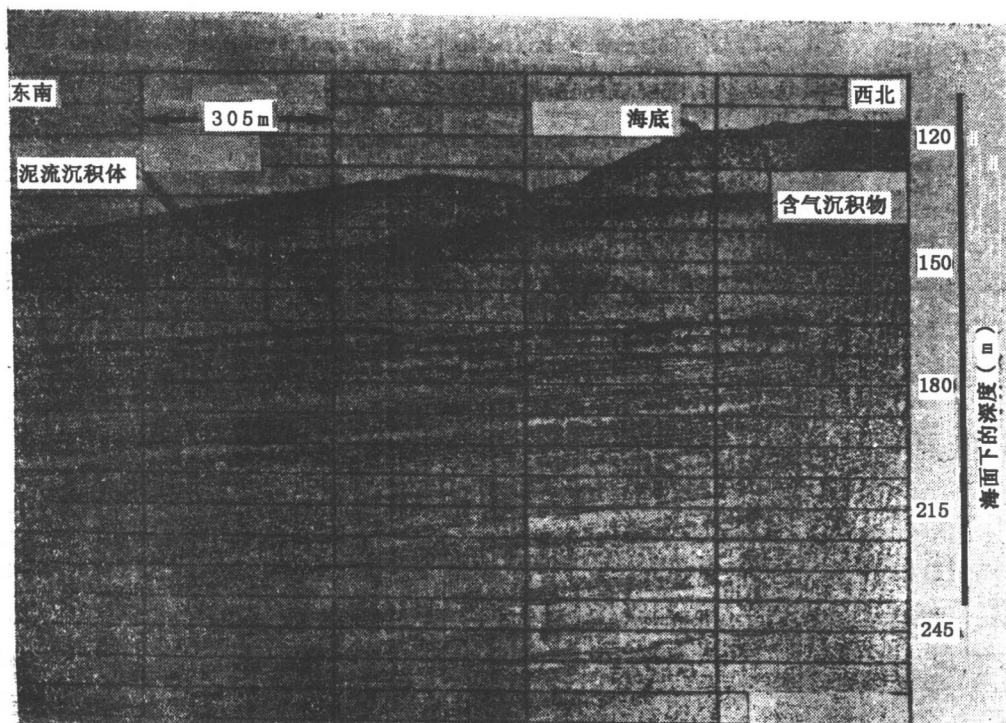


图 1-9 可能的浅层天然气特征^[5]

七、可能的天然气水合物

在海台和陆坡得到的高分辨率地震反射记录上，显示出一种平行于海底而横切地层层面的清晰的浅层反射，它被称为“拟海底反射”(BSR)。BSR 被认为是成岩变化所引起的，可能是天然气水合物，可以用它来指示一种可能的天然气资源，并能为截聚油气提供一种盖层。因为它们可以提供一种界面，在此界面下超压状态的天然气能得以赋存。而它们对开发工程也可能形成潜在危害。

八、碳酸盐岩隆(包括滩和礁)^[5]

由于碳酸盐岩隆和包围它的地层之间在沉积或层理特征上有明显的差别，因而可根据地震资料来直接识别它。它的直接标志包括边界结构、来自沉积地貌顶部和侧面的反射以及盖在岩隆上面的上超反射，这些反射结构直接决定了岩隆的边界(图 1-10) 其次 还包括内部模式，来自岩隆内部的反射振幅、频率或连续性，或者来自岩隆内部和侧向相邻的时代相同地层之间的反射或者比较年轻的上超反射的振幅、频率或连续性，可能发生变化。这些变化都是在岩隆内部地层之间，或者在岩隆与包围岩隆的地层之间存在层面特征的差异、存在着密度和或者速度差异的地方产生的。

通过高分辨率海洋地球物理勘测，结合其他调查手段，可编制出水深图、海底底质图、浅地层单元等原图、浅层构造图、地质特征图和剖面图等一系列解释图件。为估计钻井和水下建筑

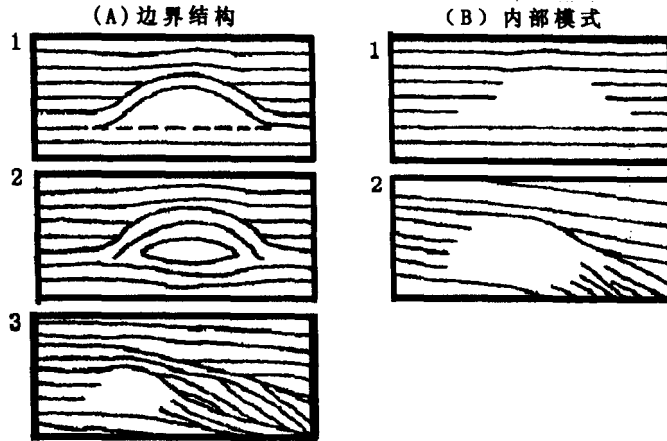


图 1-10 直接识别碳酸盐岩隆的地震标志^[5]

的潜在危险及土工学的基础设计提供了完整的资料。

第四节 海洋三维地震^[6]

三维地震也称 3D 地震 (three dimensional seismic)，一般应用于勘探油气前景较好而地质构造比较复杂的地区，作构造详查用。三维人工地震在探索海底天然气中也很有用。虽然油气远景评价最后阶段的图件只是用等值线图表示的，但所有地下图像最终必须用三维形式来表示。然而，当地质现象很复杂或者说分辨率要求很高的情况下，常常从数据采集开始，就没有其他手段可以代替三维地震系统来处理初期调查阶段就出现的三维地质问题。从逻辑上说，要解决三维地质问题，就应采用充满空间的三维数据体，而不能依赖传统的二维垂直地震剖面。

1985 年夏季 范时清、姜绍仁著文“ 高分辨率海洋物探与三维地震 ”刊于国际性刊物 对海洋三维地震问题作了系统介绍^[6]。

一、3D 数据采集

与地震调查的常规方法相比，三维人工地震法意味着地震数据点密度的大幅度增加。对某些局部构造地区作三维地震详查时，需要布设密集的人工地震探测线。

三维人工地震海上观测系统多种多样，最常见的观测系统是平行共深点剖面排列和十字交叉排列。平行共深点剖面排列由一组测线间距很小（如为 100m 和彼此平行或大致相同的羽状角）的测线组成。由于海上作业时等浮电缆受海流变化影响，常使反射点呈羽毛状分布，而进行三维数据处理时必须要有精确的反射点位置，所以深海作业时需加上电缆追踪器，以便准确测定电缆位置。

T-排列 可视为其他 3D 观测系统的简化，它是十字交叉排列的一半，炮点和检波点分别布置在两条相互垂直的直线上。改变炮点和检波点的布置可扩展成任意排列。对每炮同时布置几条平行检波线可得到多次覆盖数据。每炮应用的道数越多勘探费用越低。若同时应用 500 道记录 则 3D 和 2D 数据采集费用大致相等。

把检波器按方格网布置在一个方形面积上或一圈圈布置在环形面积上，炮点围绕方形或

环形布置，则构成方格网状排列或环形网状排列。其优点是可同时获得 2D 纵测线共深点数据和 3D 面积数据。2D 纵测线共深点多次覆盖数据可用常规处理程序估算静校正和求取速度。

二、3D 数据处理

3D 数据处理包括全部 2D 常规处理步骤。静校正、速度分析和 3D 偏移是 3D 处理成功与否的关键。为保证速度分析和静校正的精度，要求数据采集有足够的覆盖次数。

偏移处理是 2D 和 3D 处理的主要区别。2D 偏移往往不能使波场正确归位，侧面波不能消除，得不到正确的构造形态，对解释无太大帮助，因而 2D 偏移并不是 2D 处理的必要步骤。3D 偏移则可使波场正确归位、绕射波收敛、侧面波消失，获得正确的构造形态，大大有利于解释。所以 3D 偏移是 3D 数据处理的主要目标。

总的说来，海上勘探工作结束后，将勘探所获取的地震剖面记录磁带输入到地震数据自动处理系统（电脑）中，按 X、Y、Z 三维程序进行总处理与运算。3D 地震勘探所采集的数据量大是令人吃惊的。以海上 3D 勘探为例，若平行布置 125 条测线，每条测线放 100 炮，24 次覆盖，2ms 采样，5s 记录长度，则其数据量可达 7.5×10^8 ，每个数据均要进行千余次运算。所以，要处理如此巨大的数据，必须要用容量较大的巨型电子计算机，如可采用 GEOMAX II 系统（图 1-11）。

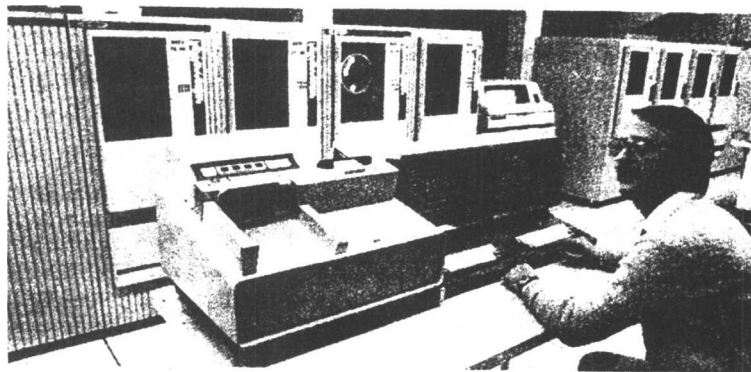


图 1-11 GEOMAX II 数据处理中心^[6]

在美国，人们也用 CRAY 电子计算机来处理 3D 地震数据资料，美国 MINNESOTA CRAY 总公司三维地震最大可做到 $1\,000 \times 1\,000 \times 1\,000$ 有限单元。

三、3D 资料解释

3D 数据处理的最终结果是三维数据体，解释者可根据需要进行各种显示。可以抽取沿构造走向、倾向及任意方向认为有意义的垂直剖面 and 连井剖面，也可以将数据体以不同时刻的瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位按水平方向显示为时间切片（图 1-12）这时自上而下不同时刻（ t_0 ）的切片可为人们提供直观的构造形态及岩性分布规律。

一张切片图可以勾绘某一反射层的一条等 t_0 线，利用多张不同时刻的切片便可勾绘该反射层的 t_0 图。如果进一步把切片图和偏移垂直剖面（ x, t ）、（ y, t ）结合在一起，则可恢复海底构造的立体模型。这对认识构造和了解断层分布都是十分有效的。不过这种方法要花费解释者的大量时间和劳动。三维图像显示和人机联作解释系统的逐步完善，将使解释者从繁重劳动中解脱出来。