



海洋科技著作出版基金

HAIYANG DIZHI KEXUE

海洋地质科学

范时清 著

(广西浪潮海洋技术开发研究所)



海洋出版社

海洋科技著作出版基金资助出版

海洋地质科学

MARINE GEOLOGY SCIENCE

范时清 著

(广西浪潮海洋技术开发研究所)

海洋出版社

2004年·北京

内 容 简 介

20 余年来,作者对中国海区及邻近大洋进行了系统的地质学研究,本书全面总结了该项工作的研究成果与相关论文,同时参考国内外最新文献,对海洋地质科学作了总体论述。

本书共分 9 章,全面阐述了海洋地质调查及其发展史、海洋三维地震、深海钻探、海洋沉积物分类及现代海洋沉积作用若干原理、海洋浊流和等深线流沉积作用、海洋沉积地球化学、古海洋学与全球变迁、大陆边缘地质、大洋地质、海底矿产资源、大洋起源与演变理论等海洋地质科学的基本问题。

本书重点论述了南海珠江口盆地、琼州海峡及雷南地区、北部湾、南沙海槽、香港地区新生代沉积相和古环境变迁历史;论述了中国边缘海域大陆架演化和大地构造的基本特征以及不同时段海洋古气候变迁记录;阐述了中国东部海洋地震及其形成原因、南海热带海洋和东亚陆缘裂谷新生代地球动力学状态;论述了南海和东海沿岸泥沙流及其柯里奥利斯力效应、沉积的涡旋动力学效应、南海沉积分带性原理;本书还重点论述了地球冰期起源和古气候变迁原因、地球和海洋起源与演变理论等。

本书资料丰富、内容新颖、图文并茂,反映了近年国际海洋地质科学发展的新动向,具有较强的理论性与实用性。

本书可供从事海洋地质、海洋矿产资源勘探与开发、海洋工程、地震和气象预报、军事、外交、渔捞和航海等部门,以及科技人员和教学工作者阅读和参考,也可供各综合性大学、海洋院校、地质院校广大师生阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

海洋地质科学 / 范时清著. —北京: 海洋出版社,
2004.11

ISBN 7-5027-6239-6

I. 海... II. 范... III. 海洋地质学 IV. P736

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 111245 号

责任编辑:刘 勃

责任印制:严国晋

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京海洋印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 24.75

字数: 630 千字 印数: 1~1000 册

定价: 98.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

**谨将此书献给中国西部大开发！
献给中华民族的伟大复兴！
献给人类文明和社会进步！**

正值中华龙腾盛世,春华绚丽,百业竞兴,中国海洋地质科学和海洋开发风起云涌,我为我的祖国感到自豪和骄傲!

谨对广西浪潮海洋技术开发研究所和海洋出版社的支持表示深切谢意!

在本书撰写期间,辛玉玲、宋黎洁、王淑兰、高云峰、鞠景远、孙丽等协助笔者在绘图、打字、抄写等方面做了大量工作,谨致谢意!

范时清

总 序

科学技术是生产力,并且是第一生产力;生产力是最革命的,革命是最大的权威。科技论著是科学技术中最重要、最成文也是最能流传的一个部分。所以,凡是真正的科技论著,都会在相关的科学技术领域中具有一定的权威性。

人类社会的发展经历了农业经济时代、工业经济时代和知识经济时代,目前是知识经济时代。在国内外经济市场上,知识就是力量,知识能创造市场、参与市场竞争、推动市场的发展,海洋科技知识也具有这种属性。科学无国界,技术造福全人类。学以致用,离不开社会实践。任何一种科学技术都有一定的价值,海洋科技知识在社会实践中也具有很高的价值。

因为海洋科技知识对人类社会是有用的,为了社会的发展和进步,我们有责任对其加以开发。广西浪潮海洋技术开发研究所位于我国西部的广西壮族自治区,是西部惟一靠海边、通大洋的省区;研究所很小,能量也不大,可是我们认识到了传播海洋科技知识的责任,应该为社会谋福利。所以我们的主要任务之一,就是要按照自己有限的视野,在力所能及的范围内,陆续组织出版各种有关的海洋科技知识书籍,以综合性文选、个人文选和专著的形式,奉献给社会,并谨此敬告读者!

我们在综合性文选中,除了选取部分公开发表的优秀论著之外,一般仅安排本所和与本所有关的专家的作品。

广西浪潮海洋技术开发研究所 谨识于南宁市

作者简介



范时清(Fan Shiqing)

范时清,1933年11月出生,广东番禺人。中国科学院南海海洋研究所研究员(曾兼任该所业务副所长)、联合国国际岩石圈委员会通讯委员、广西浪潮海洋技术开发研究所副所长。在海洋沉积相与第四纪古气候波动、地球岩石圈动力学状态、地球冰期起源、工程地质评价等方面有精深研究。曾先后主持中国科学院“黄、渤、东海海底地质构造和地球物理构造调查研究”、“南海及邻区沉积模式、沉积相、物质组成、陆架形成发育的调查研究”、“南海近海石油开发区工程地质调查与评价”等重点科研项目。在作为主要研究者的成果中,“南海北部湾涠11-1海区工程地质调查和评价”获1987年国家科技进步奖二等奖;“中国及邻区海、陆大地构造图”获1987年国家自然科学奖三等奖;“珠江口外陆架沉积环境及沉积物运移的统计学研究”获1990年中国科学院自然科学奖三等奖,并获其他多项成果奖。代表性

著作有《世界大洋地质基本轮廓》、《地球与海洋》、《中国气候变化及其影响——海洋的古气候变迁记录》、《南海地质》等书。发表学术论文40余篇,有许多篇论文先后在德国、美国、澳大利亚、日本、俄罗斯、韩国和中国香港特别行政区等国际学术会议上进行了交流。

目 次

第一章 海洋地质调查和深海钻探	(1)
第一节 国际海洋地质调查历史	(1)
一、从史前到 18 世纪末——海洋地质知识累积时期	(1)
二、从 19 世纪到 20 世纪 50 年代——海洋地质学建立和发展时期	(3)
三、20 世纪 50 年代以来——现代海洋地质科学时期	(4)
第二节 高分辨率海洋地球物理调查	(7)
一、海底地形调查	(8)
二、侧扫声呐调查	(8)
三、海底磁力探查	(12)
四、海底浅地层剖面测量	(12)
五、高分辨率多道数字地震测量	(12)
第三节 若干海底地质现象的地震识别	(13)
一、海底沉积层分层结构及其类型	(13)
二、海底滑坡(submarine landslide)	(13)
三、不稳定沉积体	(13)
四、底辟	(14)
五、泥流沉积体	(14)
六、浅层气集聚	(14)
七、可能的天然气水合物	(15)
八、碳酸盐岩隆(包括滩和礁)	(15)
第四节 海洋三维地震	(16)
一、3D 数据采集	(16)
二、3D 数据处理	(17)
三、3D 资料解释	(17)
第五节 海底结构与构造的常规海洋物探	(18)
一、海洋人工地震测量	(18)
二、海洋重力测量	(19)
三、海洋磁力测量	(19)
四、海底热流测量	(19)
五、海洋电法测量	(19)
第六节 海底沉积调查与深海钻探	(20)
一、海底沉积取样	(20)
二、深海钻探取样	(20)
第二章 海洋沉积学若干原理	(22)
第一节 海洋沉积物分类原理	(22)

一、近岸沉积(littoral sediment)·····	(22)
二、浅海沉积(shallow water sediment)·····	(23)
三、半深海沉积(hemipelagic sediment)·····	(23)
四、深海沉积(deep sea sediment)·····	(24)
第二节 实例·····	(24)
一、南海中北部沉积成因类型·····	(24)
二、南海深海晚第四纪火山沉积物及其起源·····	(28)
三、南海沉积物中的微玻璃陨石·····	(34)
第三节 现代海洋沉积作用若干原理·····	(38)
一、海洋沉积柯里奥利斯效应·····	(39)
二、海洋沉积涡漩动力学效应·····	(48)
三、海洋沉积上升流动力学效应·····	(49)
四、海洋沉积波浪与潮流动力学效应·····	(50)
五、海洋沉积气候分带性原理·····	(51)
六、海洋沉积垂直分带性原理·····	(58)
七、海洋沉积环陆分带性原理·····	(59)
第三章 海洋浊流和等深线流沉积作用·····	(62)
第一节 概言·····	(62)
第二节 浊流沉积(turbidity sediment)·····	(62)
一、鲍马层序(序列、模式)·····	(63)
二、浊积物物质成分·····	(63)
三、浊积物粒度·····	(63)
四、浊积物层理·····	(63)
五、浊积层底面构造·····	(64)
第三节 海洋浊流作用·····	(65)
一、海洋浊流作用与深海电缆折断问题·····	(65)
二、海洋浊流作用和海底峡谷的成因问题·····	(66)
三、海洋浊流作用与深海砂问题·····	(69)
四、现代海洋浊流形成机制及其模式·····	(70)
第四节 等深线流沉积作用·····	(71)
第四章 海洋沉积地球化学·····	(74)
第一节 海洋沉积地球化学基本问题·····	(74)
第二节 海洋沉积物同位素年代测定·····	(74)
第三节 实例·····	(76)
一、黄海、渤海、东海与南海沉积地球化学若干特征·····	(76)
二、南海北部海域软泥水地球化学·····	(88)
三、琼州海峡氨基酸沉积地球化学特征与古环境·····	(93)
四、海洋化学元素与地球起源——次生星云说·····	(100)
五、海洋沉积物 ²¹⁰ Pb波动与古环境因子关系·····	(107)
第五章 古海洋学与全球变迁·····	(114)

第一节 古海洋学与全球变迁	(114)
一、古海洋学研究方法	(115)
二、洋盆演化的威尔逊旋回	(116)
三、古海洋的演化	(118)
四、地球灾变性事件	(118)
五、白垩纪中期大洋缺氧事件(OAE)	(124)
第二节 南海地区沉积相与古环境演化	(125)
一、南海北部珠江口盆地新生代沉积相及地质古环境变迁	(126)
二、香港晚第四纪的古环境和沉积作用	(138)
三、海南岛鹿回头沿海地质古环境和古海面变迁	(145)
四、琼州海峡新生代地质古环境变迁	(162)
五、雷州半岛南部地区晚第三纪沉积古环境演化	(168)
六、海南岛西北面海区晚第四纪沉积与环境	(172)
第三节 中国近海古气候变迁记录	(179)
一、渤、黄海区不同时段的气候	(180)
二、东海区不同时段的气候	(185)
三、南海区不同时段的气候变迁	(188)
四、南海南沙海槽区不同时段的气候变迁	(191)
五、中国近海古气候特征	(197)
第四节 地球古气候变迁原因、冰期起源与天体脉动说	(200)
第六章 大陆边缘地质	(212)
第一节 大陆边缘地形单元	(212)
一、陆架(continental shelf)	(212)
二、边缘台地(海台, submarine plateau)	(214)
三、大陆坡(continental slope)	(214)
四、陆隆(continental rise)	(214)
五、岛弧和海沟	(215)
六、边缘盆地(marginal basin)	(216)
第二节 大陆边缘基本类型	(218)
一、太平洋型大陆边缘	(218)
二、大西洋型大陆边缘	(220)
三、转换型大陆边缘(剪切型大陆边缘)	(221)
第三节 西太平洋大陆边缘地质问题	(222)
一、中国边缘海地形地貌轮廓	(222)
二、中国边缘海大陆架的起源和演化	(233)
三、中国东部海洋地震及其形成原因	(242)
四、渤海基底倒形结构形成机制	(247)
五、中国边缘海域大地构造特征	(253)
第七章 大洋地质	(269)
第一节 洋底地形基本单元	(269)

一、大洋盆地	(269)
二、大洋中脊(mid-oceanic ridge)	(271)
第二节 洋壳(oceanic crust)	(273)
第三节 太平洋地质	(275)
第四节 印度洋地质	(291)
第五节 大西洋地质	(303)
第六节 北冰洋地质	(308)
第八章 海底矿产资源	(312)
第一节 海底固结岩层中的矿产	(312)
一、海底石油资源	(312)
二、海底硫磺和盐矿	(318)
三、海底固结矿	(318)
第二节 海底自生矿床	(319)
一、深海锰结核	(319)
二、海底多金属软泥	(324)
三、海底磷质结核(磷钙矿)	(326)
四、海底海绿石	(327)
五、海底重晶石	(327)
第三节 海底金属与非金属矿砂	(327)
第九章 大洋起源与演变理论	(331)
第一节 原生说	(331)
第二节 次生说	(331)
一、大陆沉降说	(331)
二、大洋化说	(332)
第三节 大陆漂移说(Theory of Continental Drift)	(333)
一、魏格纳的大陆漂移说	(333)
二、海底扩张-板块构造说	(337)
第四节 南海热带海洋和东亚陆缘裂谷新生代地球动力学状态	(371)
一、概论	(372)
二、实例	(373)
三、形成机制	(380)
参考文献	(382)

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。

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;为了弄清与人民生产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 И. И. 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。

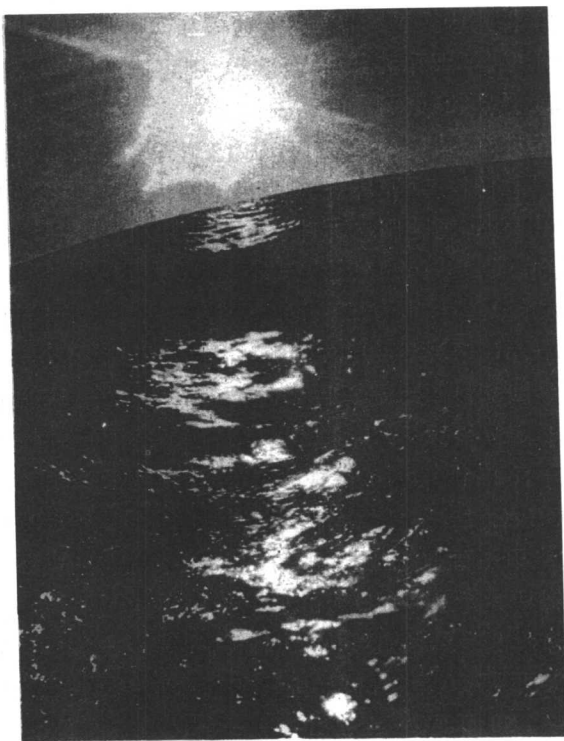


图 1-1 广阔的海洋^[2]

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余个国家,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68 900 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70 000 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11 034m,在千岛—勘察加海沟发现了深海渊(10 382m)。在考察中取得了40m长的海底柱状样品,分析研究了长达1 000万年的地质历史。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)、“鹦鹉螺”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,由美国斯克里普斯海洋研究所(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(Rosenstiel 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 $8\,000\text{m}$ 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 $16\,870\text{t}$, 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 $8\,230\text{m}$ 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,更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。