



国家自然科学基金项目 (41476039、91328205和41576068)

国家科技支撑计划项目 (2006BAB19B02)

资助

南海东南部海域地质构造 及其油气资源效应研究

Study on Geological Structure and Its Effects on Oil-Gas
Resources in Southeastern South China Sea Waters

刘海龄 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

南海东南部海域地质构造 及其油气资源效应研究

刘海龄 等 著

国家自然科学基金项目 (41476039、91328205 和 41576068) 资助
国家科技支撑计划项目 (2006BAB19B02)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以板块构造理论为指导,通过对大量多道反射地震剖面的构造-地层解释和区域地质、地球物理、地球化学、岩相古地理、古生物、古地磁资料的综合分析,系统阐述南海东南部海域地球物理场与地壳结构特征、前新生代地层-构造特征、新生代沉积特征及演化、新构造特征、含油气盆地形成演化过程;科学地提出古双峰-笔架碰撞造山带概念和研究地区中生代晚期大地构造单元划分方案;首次揭示古双峰-笔架碰撞造山带的形成演化与冈瓦纳古陆北缘碎块裂离-漂移、特提斯消亡、亚洲增生、华南陆缘新生代裂解、南海形成的内在联系;最终预测该海域油气资源前景。

本书可供南海地质构造、海洋地球物理、海洋石油地质、海洋工程地质等方面的有关院校师生、科研院所科技工作者和爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

南海东南部海域地质构造及其油气资源效应研究 / 刘海龄等著. —北京:科学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-03-054112-3

I. ①南… II. ①刘… III. ①南海-海洋地质-地质构造-关系-油气资源-研究 IV. ①P736.1②TE155

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 190676 号

责任编辑:王 运 陈姣姣 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 360 000

定价: 178.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者名单

刘海龄 阎 贫 姚永坚 詹文欢 孙龙涛

杨树春 赵俊峰 赵美松 吴朝华 杜云空

前 言

南海东南部海域发育欧亚板块东南前缘的南沙地块，东面和南面分别毗连太平洋构造域西北前缘和印澳构造域东北前缘。因其复杂的地质环境和良好的自然资源条件，近年来国家对南海东南部海域格外重视，启动了多项研究项目以攻克其基础地质和油气资源等多方面的科学问题。

本书是作者近年来所承担的有关该海域的国家自然科学基金项目和国家科技支撑计划项目部分研究成果的集成。其中国家科技支撑计划项目“南沙海区油气和微生物资源调查技术及应用研究”第二课题“南沙海区油气和微生物资源调查技术及应用研究”的第二子课题“南沙海区油气成盆成藏的构造控制作用”（2006BAB19B02-2）的研究成果集中了三个研究专题的成果精华。这三个专题分别是“礼乐盆地区域地质背景和演化过程分析”“礼乐盆地油气成藏条件分析”与“礼乐盆地油气系统分析及油气资源前景预测”，依次由中国科学院南海海洋研究所、国家海洋局第二海洋研究所和中海石油（中国）有限公司北京研究中心承担。

本书共 13 章。前言由刘海龄执笔。第一章绪论由刘海龄执笔。第二章礼乐盆地地球物理资料补充采集中第一节多道反射地震探测由阎贫执笔；第二节重力测量由赵俊峰执笔；第三节资料的初步处理中多道发射地震资料初步处理小节由阎贫执笔；重力资料初步处理小节由赵俊峰执笔。第三章礼乐盆地区域地球物理场与地壳结构中第一节重力、磁力场特征与地壳结构特征由赵俊峰执笔；第二节地震地层特征与盆地构造特征由阎贫执笔。第四章礼乐盆地前新生代地质特征由刘海龄执笔。第五章礼乐盆地中-新生代沉积特征及演化中第一节至第三节（礼乐盆地地质构造特征、地震层序界面特征及地质属性、中-新生代地层特征）由刘海龄、姚永坚执笔；第四节新生代沉积相平面展布及演化特征由姚永坚、刘海龄执笔。第六章礼乐地区新构造特征由詹文欢执笔。第七章前新生界冲断-褶皱构造与古双峰-笔架碰撞造山带的发现由刘海龄、赵美松、吴朝华执笔。第八章古双峰-笔架碰撞造山带的古地磁运动学证据由刘海龄、杜云空执笔。第九章古双峰-笔架碰撞造山带的区域地质证据及南沙区域大地构造演化由刘海龄、吴朝华、赵美松执笔。第十章礼乐盆地形成演化及其物理模拟由孙龙涛执笔。第十一章礼乐盆地油气成藏条件分析由刘海龄执笔。第十二章礼乐盆地油气系统分析及油气资源前景预测由杨树春执笔。第十三章主要成果与建议由刘海龄执笔。全书由刘海龄统稿。

本书出版得到了国家自然科学基金项目、国家科技支撑计划项目、国家科学技术学术著作出版基金的资助，在此一并表示诚挚的谢忱。

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 前人对礼乐海域地质调查研究工作概况	1
第二节 本书对礼乐海域新增地质调研工作概况	3
第二章 礼乐盆地地球物理资料补充采集	5
第一节 多道反射地震探测	5
第二节 重力测量	5
第三节 资料的初步处理	7
第三章 礼乐盆地区域地球物理场与地壳结构	12
第一节 重力、磁力场特征与地壳结构特征	12
第二节 地震地层特征与盆地构造特征	16
第四章 礼乐盆地前新生代地质特征	21
第一节 南沙海区中生界时空展布的基本特征	22
第二节 南沙海区中生界岩相特征概要	33
第三节 南沙海区中生界构造特征	34
第四节 南沙海区中生界形成背景分析	35
第五章 礼乐盆地中-新生代沉积特征及演化	39
第一节 礼乐盆地地质构造特征	40
第二节 地震层序界面特征及地质属性	43
第三节 中-新生代地层特征	45
第四节 新生代沉积相平面展布及演化特征	47
第六章 礼乐地区新构造特征	55
第一节 新构造运动起始之前地层和岩石特征	55
第二节 新构造运动起始时限	58
第三节 地壳升降运动	60
第四节 断裂活动	63
第五节 火山活动	68
第六节 地震活动	69
第七章 前新生界冲断-褶皱构造与古双峰-笔架碰撞造山带的发现	71
第一节 南海南缘冲断-褶皱构造地震剖面特征及分带性	71
第二节 南海北缘冲断-褶皱构造的地震剖面特征	79
第三节 古双峰-笔架碰撞造山带的发现	88

第八章 古双峰-笔架碰撞造山带的古地磁运动学证据	89
第一节 海南岛区域地质背景	90
第二节 海南岛古地磁样品及测试结果	92
第九章 古双峰-笔架碰撞造山带的区域地质证据及南沙区域大地构造演化	101
第一节 南海及邻区的特提斯构造域	101
第二节 南海中生代晚期构造格局基本特征	112
第三节 南海中生代构造动力学环境浅析	113
第四节 南海中生代中晚期构造演化特征	115
第五节 南沙海域中生代海相残余型盆地构造特征	118
第六节 南沙地质构造演化过程的油气资源效应	127
第十章 礼乐盆地形成演化及其物理模拟	137
第一节 研究现状	137
第二节 大地构造背景	138
第三节 资料与数据	139
第四节 断裂分析	139
第五节 地层分析	141
第六节 物理模拟验证	145
第十一章 礼乐盆地油气成藏条件分析	159
第一节 礼乐盆地及其邻区区域地质和油气地质概况	159
第二节 礼乐盆地油气藏条件	161
第十二章 礼乐盆地油气系统分析及油气资源前景预测	175
第一节 引言	175
第二节 区域地质背景	176
第三节 礼乐盆地热历史	183
第四节 礼乐盆地烃源岩热演化史	202
第十三章 主要成果与建议	214
第一节 主要成果	214
第二节 对未来研究的建议	216
主要参考文献	220

第一章 绪 论

南沙群岛海域是世界上公认的海洋资源最丰富的地区之一,初步查明其石油总储量为 350 亿 t,天然气为 10 万亿 m^3 。南沙群岛海域是太平洋与印度洋之间的战略交通要道,是中国、日本和韩国等东亚国家的能源和贸易运输大通道,是我国战略防卫前沿阵地和我国海军未来在南海军事活动的重要支撑点,其战略地位十分重要。

第一节 前人对礼乐海域地质调查研究工作概况

菲律宾东盟石油委员会曾在 20 世纪 70 年代对巴拉望岛西北地区进行了地球物理调查,其中 DD'测线穿过礼乐滩;1976 年 4 月美国阿莫科 (Amoco)、菲律宾 Salen 石油公司在礼乐滩上钻探了桑帕吉塔 (Sampaguita) -1 井,井深 4123.9m,揭露的地层有下白垩统(缺失上白垩统)、古新统一第四系,均为滨、浅海-半深海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积,且在古新统砂岩 (3150~3160m) 中钻获天然气 (10.47 万 m^3/d) 和凝析油,在始新统三角洲砂岩中钻获天然气 (16.9 万 m^3/d);随后,Amoco 和 Salen 等石油公司又在礼乐滩上完成了 6 口普查井,其中 Sampaguita-3A 井也见气显示;从 1992 年开始,菲律宾政府邀请外国石油公司在该区开展地球物理调查,迄今为止,未曾中断。2002 年第 10 期 *Offshore* 曾报道,斯特林能源公司获得了巴拉望近海礼乐滩地区的勘探许可证,估计在礼乐滩盆地一油气田中赋存有 1145 亿 m^3 的天然气,并与菲律宾政府签订了 60:40 的产量分成合同 (张松举,2003)。这表明在礼乐滩盆地的勘探已取得了一定的进展,并获得了新的油气发现。

Taylor 和 Hayes (1980, 1983) 根据南海邻区古地磁及地质资料编制了南海构造演化图,并简述了礼乐地区及邻区的构造发展;Holloway (1982) 也专门论述了北巴拉望断块 (包括民都洛岛、巴拉望岛北部和礼乐滩) 的成因和地质历史。

1982~1983 年,联邦德国地质科学和自然资源研究所 (BGR) 用“Sonne 号”调查船在礼乐滩南部海域进行了 SO-23 和 SO-27 两个航次近 10000km 的地质-地球物理综合调查,包括多道地震、重力、磁力和海底拖网取样分析,在地震剖面中识别出 5 个区域不整合面,并在美济礁附近采集到中三叠统硅质页岩。

1982 年,地质矿产部南海地质调查指挥部第二海洋地质调查大队“海洋二号”调查船在开展广州—巴拉望地学断面综合研究时,于南海北部陆坡、礼乐滩地区完成了一条南北向的地震、磁力测量大剖面。剖面南段进入礼乐盆地东北部时,“海洋二号”调查船发现该处有较厚的沉积地层。1993 年,第二海洋地质调查大队在南沙海域东南部 933 工区地质-地球物理路线调查中有 4 条测线 (NS93-1、NS93-2、NS93-3、NS93-4) 穿越本区的东南部边缘,证实了礼乐东断裂的存在。1997~1999 年,广州海洋地质调查局负责实施“126 专项”11 课题,并对礼乐盆地等海域进行了综合地球物理路线调查,结合前人的地质、地球物理及地球化学资料,编写了“管辖海域沉积盆地多道地震补充调查研究报告”,

阐述了礼乐盆地地层分布及沉积、构造特征,划分和建立了地震层序,并推断了各层的地质时代。为了进一步查清礼乐盆地的地质构造特征和含油气远景,广州海洋地质调查局于2001年在该海域开展了“十五-1”科考地球物理区域概查工作,对盆地的地球物理特征、沉积与构造特征及油气地质条件等进行了综合分析,对油气资源远景做出了初步评价。

1987年,何廉声等在《南海地质地球物理图集(1:200万)》中初步圈定了盆地的范围,并命名为礼乐滩盆地,其性质属裂离陆块型,面积约3.9万km²。

1989年,吴进民等在“七五”国家重点科技攻关项目“南海主要盆地地质构造特征及成气条件”报告中取名为礼乐盆地,简要分析了盆地的地层与沉积、构造特征及成气条件,阐述了盆地的形成与演化,认为礼乐盆地的形成经历了早期陆缘张裂(古近纪)、后期陆块漂移(晚新生代)两大发育阶段,属于陆缘张裂-裂离陆块型盆地,并就礼乐地块的性质与来源等地质问题做出了解释。

1997年,李唐根等在“南沙海域地质构造特征及演化历史分析研究”等报告中对礼乐盆地构造特征、沉积特征及油气地质条件等进行了不同程度的研究,为该盆地的进一步研究工作提供了重要的参考资料。

2001年,刘宝明等在“126”专项HY126-03-13-03专题研究报告“我国南沙专属经济区和大陆架油气资源评价”中,论述了盆地的地层与沉积特征,生、储、盖及其组合,并对其油气资源远景做出了初步评价,认为其生油气条件中等,具有一定的油气远景,是南海油气勘探的重要后备基地。

1989~2002年,中国科学院南海海洋研究所先后七次组队,用“实验二号”调查船对南沙海域进行了环境与资源调查。调查中有17条多道地震测线(L1、L2、L3、L4、L5、90n10-2、91N-15、93N-16、94N-1、94N-2、99n-3、99n-4、99n-5、99n-6、99n-7、02n03、02n04)进入该区。中国科学院南海海洋研究所初步圈定了礼乐盆地的范围,并对其地质构造特征及油气资源远景进行了论述(刘海龄等,2002a;阎贫等,2005)。

1999年2~4月全球最大的科学考察船——大洋钻探船“JOIDES·决心号”ODP 184航次首次在南海进行了主题为“东亚季风史在南海的记录及其全球气候意义”的为期两个月的钻探考察。第二个航次为2014年1月26日~3月30日开展的“国际大洋发现计划”IODP 349航次。该航次是新十年科学大洋钻探——国际大洋发现计划的第一个航次,其主题是“南海张裂过程及其对晚中生代以来东南亚构造、气候和深部地幔过程的启示”。2017年2月开始进行的南海第三次钻探航次的主题为“南海岩石圈破裂过程”。深钻探对揭示研究区深部地质特征起到了十分重要的作用。

中国地质调查局广州海洋地质调查局于2015年编绘并出版了新的《南海地质地球物理图系(1:200万)》,包含地形图、地貌图、三维地形图、底质图、空间重力异常图、布格重力异常图、磁异常平面图、磁异常剖面平面图、莫霍面深度图、新生界厚度图、地质图、海区沉积基岩图、中-新生代沉积盆地分布图、大地构造格架图共14幅图种,为研究区地质与资源研究提供了丰富的区域地质-地球物理资料。

2016年结题的“中国海及邻域地质地球物理系列图”项目,由中山大学蔡周荣、中国科学院南海海洋研究所刘海龄和青岛海洋地质研究所朱晓青等科研人员,在综合分析收集资料的基础上,开展了中国海域及邻区新构造期差异升降运动、断裂活动、岩浆活动、

地震活动、地热、应力场及地质灾害等新构造类型的调查和编图工作，并计划出版《中国海域地质地球物理系列图新构造地质图（1：100 万）》。

纵观前人的研究工作，其调查研究主要集中在研究区新生代以来的地质过程，对新生代地质过程的资源效应及前新生代地质过程尚缺乏系统的认识。这给本书的研究留下了较大的探索空间。

第二节 本书对礼乐海域新增地质调研工作概况

我国以南沙群岛为重点的南海战略进入了维护主权和资源开发的新阶段，迫切需要服务于这一新的南海战略的科技数据支撑。

为了服务于国家南海战略和科学探索，本书以南沙群岛礼乐滩海区为重点区域，以维护主权利益、加快资源开发、确保国防安全为目标，开展一系列调查研究工作，以解决南沙群岛及其邻近海区环境、生态、资源重大科学与技术问题，为国家南海战略提供科技支撑。已完成的具体研究目标、研究内容和实际调查工作如下：

本书研究工作的主要目标是通过收集以往南沙群岛礼乐盆地及其邻近海区的地质-地球物理资料，补充和重新采集部分地球物理资料（图 1.1），进行综合分析解释，阐明礼

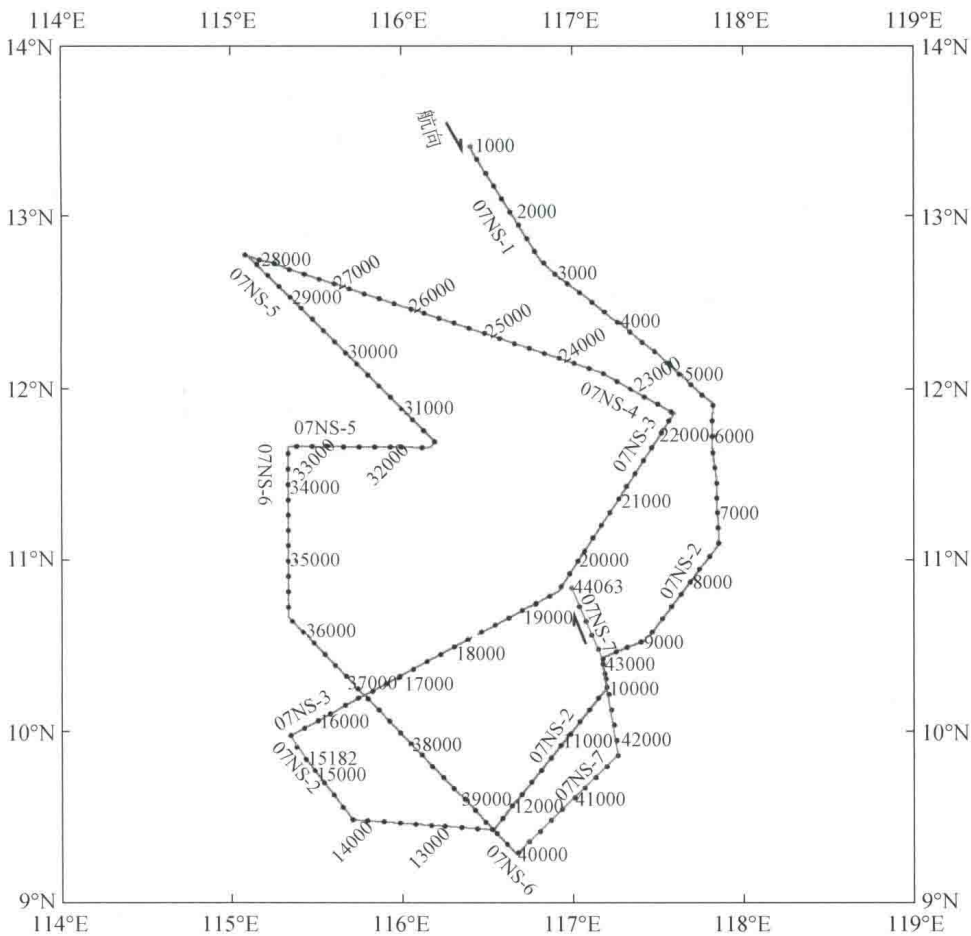


图 1.1 2007 年中国科学院南海海洋研究所礼乐海区综合地球物理调查测线分布图

乐盆地的区域构造属性、盆地地质构造特征,揭示盆地的沉积体系、基底地质特征,研究盆地油气地质条件,评价油气资源前景,提出礼乐盆地的油气成藏模式。

针对研究目标,已开展的研究工作的主要内容是:以礼乐盆地为重点,在充分利用地球物理、地质构造资料,并对其进行综合研究的基础上,系统地分析南沙群岛新生代构造,特别是对新生代地堑-半地堑构造进行深入的研究,并对现有的典型地震剖面进行精细的地震地层学和层序地层学解释,分析南沙群岛海区古近系的时空分布特征和岩相特征,按照构造对沉积的控制规律,为重点含油气盆地的圈定与分析,以及含油气系统的研究提供较为准确的烃源岩地层资料,深化油气形成理论的认识。具体包括如下几个方面:

(1) 进行礼乐盆地区域地质背景和演化过程分析。分析礼乐盆地及其相邻的南沙群岛海区的地壳性质,盆地形成的区域地质、大地构造背景及演化过程,结合重磁震联合反演,研究沉积基底。

(2) 进行礼乐盆地油气成藏条件分析。结合区域地质、构造和层序地层等研究,应用含油气系统理论和方法,对礼乐盆地地层分布、沉积环境、油气生成、运移和聚集的时空配置等进行综合分析,预测油气分布的有利区带。

(3) 进行礼乐盆地油气系统分析及油气资源前景预测。在上述研究资料的基础上,充分利用盆地模拟、油气成藏过程模拟等软件技术,研究盆地沉降史、热演化史,油气生成、运移、聚集和圈闭形成等油气成藏作用,以及构造演化对油气聚集的控制作用,探讨油气藏的形成机制,深化研究区资源潜力的认识。

同时,完成了一系列的实际工作。主要包括以下几个方面:

(1) 针对礼乐盆地的油气资源前景,对礼乐盆地进行了地球物理调查和构造分析,结合历史资料,评估了礼乐盆地的油气分布,并对油气形成理论做出了创新。

(2) 选择1~2条骨干剖面(200km),进行了盆地模拟和构造分析。

(3) 完成了1个航次的海上地球物理调查研究,新完成地球物理实测测线约2200km,测线包括07NS-1、07NS-2、07NS-3、07NS-4、07NS-5、07NS-6、07NS-7(图1.1)。

第二章 礼乐盆地地球物理资料补充采集

第一节 多道反射地震探测

南沙群岛地震调查时间为 2007 年 7 月 6 ~ 27 日，测线总长 2203km，有效测线总长 2153km（图 1.1），超过计划 2000km。调查采用“实验二号”调查船载的 DFS-V 地震仪，3 支气枪组合容量为 2200in³^①，48 道记录，记录长度为 8 ~ 10s。原始记录为 SEGB 格式，现场作业转记为 FOCUS 内部格式文件 *.dsk，存储于硬盘。

施工期间虽遭遇严重风浪，部分记录噪声较大，但大部分记录质量较好（图 2.1），显示出较清晰的海底地层结构和海山地貌。

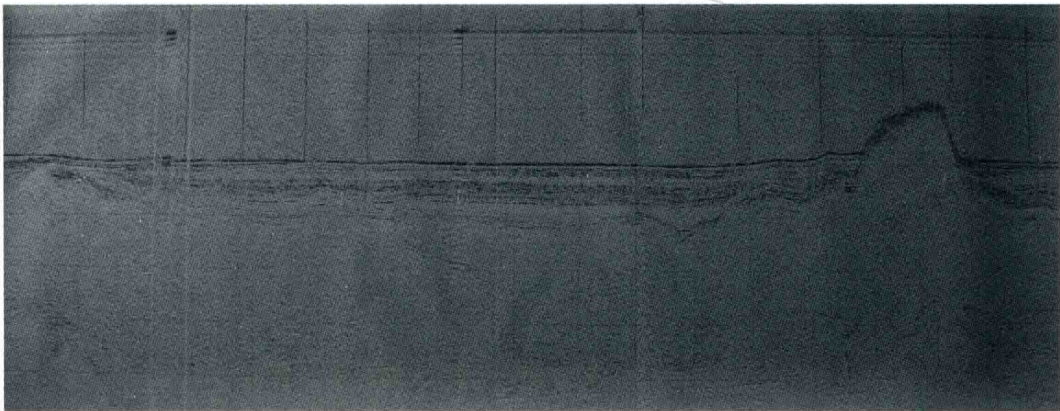


图 2.1 近道监控记录剖面片段

第二节 重力测量

一、测量仪器

本航次重力测量使用德国 Bodenseewerk 公司生产的 KSS-30 型海洋重力仪，该仪器性能稳定，测量精度较高，可以满足本航次科研考察任务的要求。该仪器出厂时的技术指标见表 2.1。

^① 1in³ = 1.63871×10⁻⁵ m³。

表 2.1 德国 Bodenseewerk 公司生产的 KSS-30 型海洋重力仪技术指标表

作业时海况条件	外界的垂直加速度/mGal *	测量精度/mGal
平静海况	<15000	0.5
恶劣海况	15000 ~ 80000	1.0
非常恶劣海况	80000 ~ 200000	2.0
船转弯或转弯补偿	15000 ~ 80000	2.5

注：仪器零点漂移<3mGal/月；仪器测量范围 10000mGal 以上

* 1Gal = 1cm/s²

经过近几年来多个航次的动态检测，该仪器的实测精度见表 2.2，该精度量级已经可以满足正常科研考察任务的需求。

表 2.2 KSS-30 型海洋重力仪实测精度表

海况条件	交叉点重力差所得的测量精度/mGal	备注
一般海况	±1.62	—
中等海况	±2.01	7 级阵风
恶劣海况	±2.67	8 级以上阵风

二、对基点

为了校正仪器本身固有的漂移误差，重力测量规范要求航次前后都要进行对基点的工作，其目的是消除后期重力资料处理时重力仪掉格带来的读数误差。本航次对基点工作所使用的重力基点为中国科学院南海海洋研究所新洲码头的重力基准点。该重力基准点是中国科学院南海海洋研究所于 1985 年因海洋重力测量需要与国际基准网点（香港皇家天文台重力基准网点 09724B、J7902）联测的重力基准点之一，联测精度达到国家规定的补充重力基准网点的要求，即小于±0.2mGal。

根据重力测量规范要求，航次前、后对基点的持续时间一般至少需要潮汐起伏一个周期，即至少 24h，以消除潮汐的影响。在本航次前、后均按要求对基点的持续时间超过 24h，但未同步观测潮汐，以潮汐最大幅值 2m 计，估计会因此造成±0.6mGal 的额外误差，这在以后的对基点工作中应注意改进。

三、测量结果

图 2.2 是本书对南沙群岛 2007 年航次实测重力测线位置图。由于航次初期仪器故障，重力测量只在原设计测线的 4 号线、5 号线、6 号线、7 号线进行，分成 9 段剖面（图 2.2 中箭头所示为剖面的方向），分别编号为 07LY03A、07LY03B、07LY04、07LY05A、07LY05B、07LY05C、07LY05D、07LY06A、07LY06B，共计实测重力测线 1460km，基本完成预定重力测量指标。

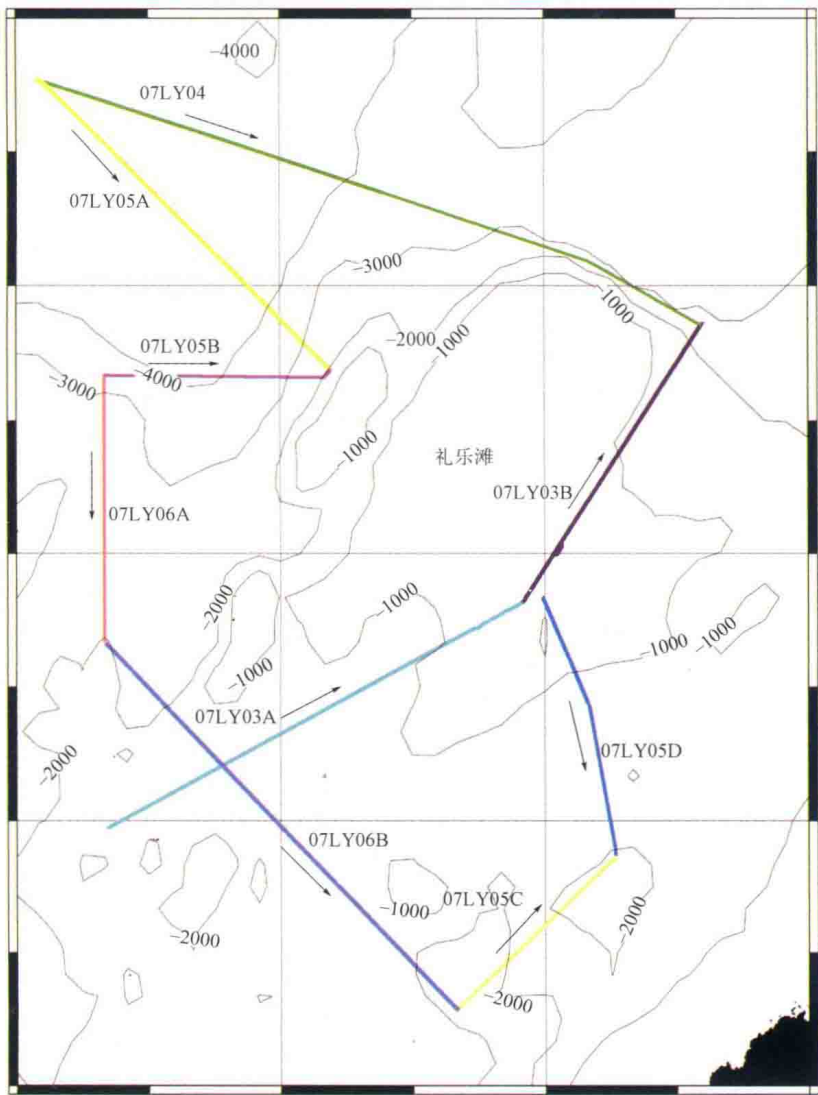


图 2.2 南沙群岛 2007 年航次实测重力测线位置图

第三节 资料的初步处理

一、多道反射地震资料初步处理

地震资料处理利用专业单位处理设备，处理软件为 ProMax。基本处理流程如下：

第一步，定义观测系统。记录道数为 48 道，道间距为 25m，炮间距为 50m，记录长度为 8s，采样间隔为 2ms，处理重采样间隔为 4ms，最小偏移距为 210m，覆盖次数为 12。气枪和电缆平均深度分别为 10m 和 15m。

第二步，静校正。静校正包括气枪和电缆平均深度分别为 10m 和 15m 时的延迟 16ms，

以及气枪延迟约 114ms, 三项合计需做 130ms 的下拉静校正。

第三步, 预处理。预处理包括坏炮剔除、漏炮位置编辑、增益恢复、初至切除和带通滤波, 重点在漏炮补位, 以消除停炮、磁带机故障和转记过程中的文件丢失对空间位置的影响。

第四步, 速度分析。速度分析包括 CDP 分选、道集形成、相关速度分析、二维滤波。速度分析取相邻 3 个 CDP 道集。

第五步, 多次波压制。多次波压制首先采用近道切除。二维速度滤波则通过在速度谱上选择低速点切除完成。由于电缆较短, 中深层和深水速度分辨率很低, 速度谱采用多点叠加以压制干扰。有效压制多次波成为处理的主要难点。

第六步, 动校正、叠加、偏移和修饰处理。偏移速度选为叠加速度的 85% ~ 95%。

通过处理, 大部分剖面反射层次丰富且分明, 基底清楚 (图 2.3)。

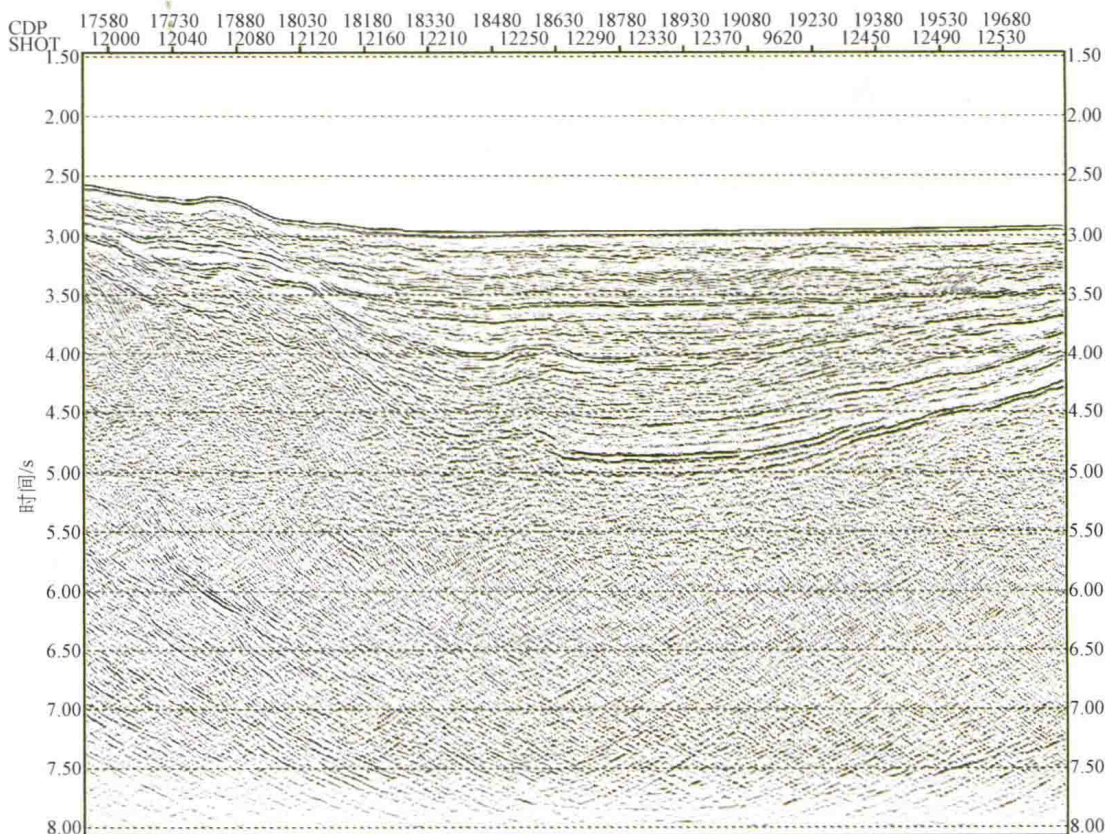


图 2.3 2007 年探测的礼乐盆地西南部剖面片段

二、重力资料初步处理

重力测量的原始数据格式主要包含三部分: 卫导数据、水深数据、重力读数。卫导数据主要包括时间、经纬度、航速、航向等数据; 水深数据由连接重力仪的测深仪器测得, 主要用于后期计算布格重力异常, 在海洋重力测量中并不是很常用, 人们所采用的重力数

据均没有水深资料,空置为0;重力读数是重力仪测得的相对重力变化值。

对实测的原始重力数据进行初步的整理,包括剔除跳变数据、删除空置项、删除重复信息等,可得到能够用于各项校正的重力数据,其格式如下:

7	201	6	2	3	12	35.516	115	38.467	289	5.3	-1931.5	-3.7
7	201	6	2	9	12	35.518	115	38.459	285.89	5.6	-1931.5	-3.7
7	201	6	2	14	12	35.521	115	38.452	291.29	4.8	-1931.5	-3.7
7	201	6	2	20	12	35.524	115	38.443	288.39	5.5	-1931.5	-3.7
时间					经纬度			航速、航向		相对重力值		

对2007年礼乐航次所采集的重力数据采用卡西尼(Cassinis, 1930)重力正常场公式和IGSN71(1971)国际重力基准网系统进行统一归算,重力数据的常规处理主要包括以下几项校正:

第一项,延时校正。海洋重力测量中重力仪的读数往往有一定时间的延迟,即显示或记录的读数不是即时点位的重力值,而是刚刚走过的某点位的重力值。延时的长短视各重力仪而异,本航次采用的中国科学院南海海洋研究所购置的德制KSS-30型海洋重力仪的延时经多次试验约为79s,以平均航速5kn(节)计算,79s的行程大约为203m,也就是说,我们在某点测得的重力值是此前203m处而不是此处的重力值,因此这个校正是必需的。

实际做校正时,我们先建立一个时间-实测重力值的数据序列,然后把所有时间减去延时时间即79s,最后根据新的时间序列从定位数据段中提取相应的经纬度、航速、航向等数据,结合实测重力值就组成了延时校正后的重力数据。

第二项,漂移校正。根据航次前、后对基点的数据,计算出两次基点测量的平均值,然后根据实测重力值的时间将两次基点测量的差值线性分配到每个测量点上。漂移校正俗称掉格校正,它可以消除重力仪因自然掉格带来的系统误差,这个误差可以达到>3.5mGal/月,2007年航次实测的漂移数达到4.0mGal/月左右。

第三项,正常场校正。重力正常场指的是地球大地水准面理论椭球体的正常重力场,通常的重力测量关心的是测区范围内偏离正常重力场的重力异常值,因此必须从实测重力测量中去除正常重力场的因素,这就是正常场校正。

采用不同的椭球体参数会得到不同的正常场校正公式,我们采用的是卡西尼公式(Cassinis, 1930):

$$r_0 = 978049(1 + 0.005288\sin^2\varphi - 0.0000059\sin^2 2\varphi) \quad (2.1)$$

式中, φ 为测站的地球纬度。

第四项,高度校正。陆地重力测量是很注意地形和高度校正的。而进行海洋重力测量时,因为大多数的海洋重力仪都安放在船的中央,并且与海平面高度一致(这样有利于海洋重力仪的平稳),所以通常不需要进行高度校正。

一般,高度校正公式为

$$\varepsilon_F = 0.3086h \text{ (mGal)} \quad (2.2)$$

式中, h 为海拔, m。

第五项, 厄特维斯改正。厄特维斯改正对于动态重力测量工作是必需的, 它主要用于消除由测量仪器速度及方向变化带来的重力读数影响。改正量 δ_{EC} 由式 (2.3) 计算得到:

$$\delta_{EC} = 7.499 \times V \times \sin A \times \cos \Phi + 0.004 V^2 \quad (\text{mGal}) \quad (2.3)$$

式中, V 为船速, kn^①; A 为船的真实航行方位角; Φ 为地理纬度。

厄特维斯改正是海洋重力测量中引起误差最主要的因素, 如果该项改正不恰当, 测量的误差会较大。该项改正关键在于正确测定航行体的航速和航向, 它们的误差可能会在很大程度上影响重力异常计算的最终结果。根据理论计算, 假设航速为 10kn, 航速误差为 0.1kn, 则造成的厄特维斯改正量 δ_{EC} 最大值可达 0.758mGal; 假设航速为 10kn, 航向误差为 1° , 折合为 0.0174rad, 则造成的厄特维斯改正量 δ_{EC} 最大值可达 1.3mGal。由此可见, 准确地确定航速、航向对厄特维斯改正至关重要。

经过以上 5 项校正即可得到海洋重力研究中常用的自由空间重力异常。对于实测重力资料, 由于 KSS-30 型海洋重力仪本身已经做了正常场校正和厄特维斯改正, 且不需要做高度校正, 因此, 只需对测得的重力异常数据做延时校正和飘移校正即可。

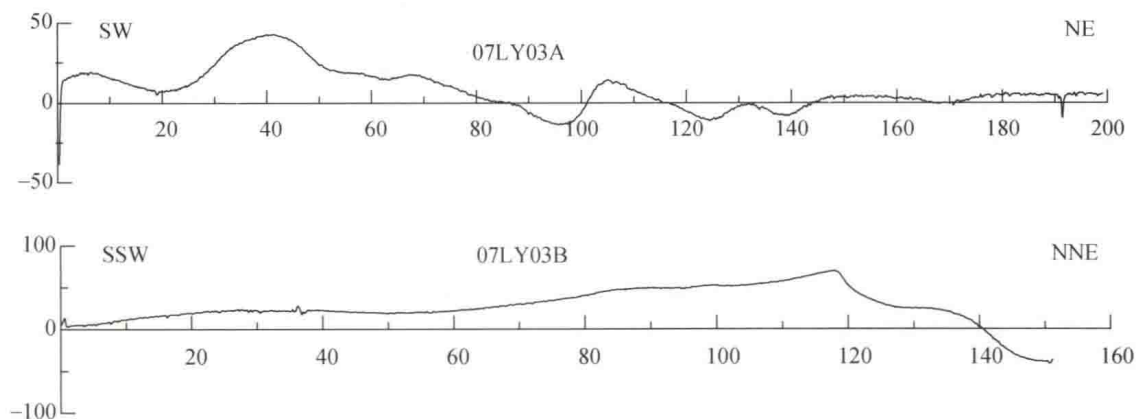
第六项, 布格改正。布格改正实质上是地形改正, 可分为全布格改正和简单布格改正。全布格改正是考虑周围整个水层对测点的重力作用而进行改正。简单布格改正简化了整个水层重力作用, 把测点对应位置的水深视为无限延伸的平板水层, 用来代替整个水层, 计算无限延伸的平板重力作用来代替整个水层重力作用。其计算公式为

$$\varepsilon_B = 0.0686h \quad (\text{mGal}) \quad (2.4)$$

式中, h 为测点处水深, m。

前述自由空间重力异常经过布格改正即可得到布格重力异常, 二者均是海洋地球物理研究的重要基础数据。

本书中 2007 年航次实测重力资料经初步处理后得到的自由空间异常图如图 2.4 所示, 共 4 线 9 段约 1460km (图中箭头所示为剖面的方向, 各段位置如图 2.2 所示)。



① 1kn = 1.852km/h。