

地震海洋学导论

宋海斌 著



上海科学技术出版社

地震海洋学导论

宋海斌 著 

宋海斌 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震海洋学导论 / 宋海斌著. —上海:上海科学技术出版社,2012.9

ISBN 978-7-5478-1370-6

I. ①地… II. ①宋… III. ①地震学—海洋学
IV. ①P315②P7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 142896 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码200235)

新华书店上海发行所经销

上海市印刷十厂有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张:12 插页:2

字数:240千字

2012年9月第1版 2012年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-1370-6 / P·13

定价:98.00元

此书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向承印厂联系调换

序

自 20 世纪 30 年代反射地震学形成一门学科分支以来,它已成为地球内部结构研究和其他地学研究的最重要方法。从 20 世纪 60 年代开始,由于采用数字技术和计算机,使反射地震学得到前所未有的发展。第二次世界大战后,反射地震学在世界能源勘查与开发中起着不可替代的作用。能源,特别是石油,在近现代世界经济繁荣发展中起着强大的推动作用。要想从地下深处钻取石油就必须找出有利于石油生成的建造和储藏石油的圈闭,而这项任务只有依靠地球物理方法,特别是反射地震学的理论和技术来完成。否则,在一望无际的平原、茫茫的戈壁沙漠或浩瀚的海洋寻找石油将难以奏效。反射地震学的成功应用和发展与现代科技总体水平密切结合,也与信息科学及相关地质学科的发展相互促进。

在 2003 年前,反射地震学只用于陆地地面或海底以下沉积层乃至岩石圈结构的调查研究,也就是说反射地震学只对固体地球进行探查。而 2003 年起步的地震海洋学则将反射地震学的研究对象拓展到流体地球之海洋,给出了海洋内部不均匀流体介质的高分辨率地震图像,用它可反演出海水层的物理参数,从而使反射地震学成为海洋科学研究的一枝新花。宋海斌博士出版的《地震海洋学导论》一书是国际上该新兴交叉学科的第一本专著,全面阐述了作者及其合作者对地震海洋学较为系统的认知。全书分为 9 章,其中第 1 章至第 4 章给出了地震海洋学的基础,第 5 章至第 9 章则给出了作者对地震海洋学图像,内波、温盐结构反演、混合强度与流速估算,以及地震海洋学在海洋地质研究的作用等方面的研究成果。

21 世纪是人类全方位面向海洋的世纪,我相信地震海洋学将在揭示海洋深处奥秘,了解海洋运动的规律等方面取得长足的进展,为人类文明和社会可持续发展做出贡献。我很高兴向地球物理、海洋学界的同仁推荐这本书,希望大家一起努力,促进中国科学技术更加繁荣。



中国科学院院士

2012 年 4 月

目 录

序

第 1 章 地震海洋学	1
1.1 地震学与海洋学的交叉学科	1
1.2 地震海洋学研究早期进展	3
第 2 章 反射地震学	11
2.1 勘探地震学	11
2.2 海洋地震测量	16
2.3 反射地震资料数据处理	21
2.4 反射地震资料解释与应用	24
第 3 章 物理海洋学	28
3.1 海洋环流	29
3.2 中尺度涡旋	37
3.3 海洋内波	41
3.4 细微结构	46
3.5 混合	48
第 4 章 海水的物理性质与声学特性	54
4.1 海水的温度	54
4.2 海水的盐度	55
4.3 海水状态方程与海水的密度	58
4.4 温盐深测量	62
4.5 海洋中的声速	63
4.6 海洋层结与跃层	65
第 5 章 海洋内部的地震成像	70
5.1 中尺度涡旋	70
5.2 内波	74

5.3	锋面与热盐细结构	77
5.4	海水地震图像的物理意义	78
第6章	海洋内波波数谱与内波位移场 EMD 分解	81
6.1	南海东北部内波的水平波数谱	81
6.2	南海东北部内波的垂直波数谱	85
6.3	Doppler 效应	87
6.4	EMD 分解	90
第7章	海洋温盐结构的地震反演	98
7.1	利用地震数据反演海水温度、盐度剖面的方法	99
7.2	利用反射地震数据和 XBT 数据联合反演海水的温盐分布	105
第8章	湍流耗散率与流速估算	112
8.1	湍流耗散率	112
8.2	关联长度与赫斯特数	118
8.3	流速估算	124
第9章	地震海洋学应用与展望	131
9.1	南海深海物理过程与地质过程的关系探讨	131
9.2	海底喷泉的地震海洋学图像	143
9.3	地转流估算与海水密度反演	147
参考文献	152
附录 A	地震波	168
附录 B	内波模型谱	177
后记	180

Contents

Preface

Chapter 1	Seismic oceanography	1
1.1	Cross discipline between seismology and oceanography	1
1.2	Early progress in seismic oceanography studies	3
Chapter 2	Reflection seismology	11
2.1	Exploration seismology	11
2.2	Marine seismic survey	16
2.3	Data processing of reflection seismic data	21
2.4	Interpretation and application of reflection seismic data	24
Chapter 3	Physical oceanography	28
3.1	Ocean current	29
3.2	Meso-scale eddy	37
3.3	Ocean internal wave	41
3.4	Fine structure	46
3.5	Mixing	48
Chapter 4	Sea water physical properties and acoustic features	54
4.1	Sea water temperature	54
4.2	Sea water salinity	55
4.3	Sea water state equation and sea water density	58
4.4	CTD and XBT probing	62
4.5	Sound speed in the sea	63
4.6	Ocean stratification and thermocline	65
Chapter 5	Seismic images of ocean interior	70
5.1	Meso-scale eddy	70
5.2	Internal wave	74

5.3	Front and thermohaline fine structure	77
5.4	Physical meaning of sea water column seismic images	78
Chapter 6	Internal wave spectra and EMD decomposition of internal wave displacement field	81
6.1	Horizontal wave-number spectra of internal waves in the northern South China Sea	81
6.2	Vertical wave-number spectra of internal waves in the northern South China Sea	85
6.3	Doppler effect	87
6.4	EMD decomposition	90
Chapter 7	Thermohaline structure inversion from seismic data	98
7.1	Inversion method for thermohaline structure from seismic data	99
7.2	Comprehensive inversion for temperature and salinity distribution from reflection seismic data and XBTs	105
Chapter 8	Turbulence dissipation and sea water movement estimation	112
8.1	Turbulence dissipation	112
8.2	Correlation length and Hurst number	118
8.3	Sea water movement estimation	124
Chapter 9	Further application of seismic oceanography	131
9.1	On relationship between physical process and geological process in South China Sea Deep	131
9.2	Seismic image of submarine springs	143
9.3	Estimation of geostrophic velocity and inversion of density structure	147
References	152
Appendix A	Seismic wave	168
Appendix B	Model spectra of internal wave	177
Postscript	180

第 1 章 地震海洋学

地震学是研究固体地球的重要地球物理学科,地震海洋学则把地震学的研究对象拓展到流体地球——海洋。地震海洋学作为一门新兴的交叉学科,以其高横向分辨率、短时间内对整个海水剖面进行成像和已有巨量反射地震数据的优势必将在物理海洋学领域获得广泛应用,对海洋学发展产生深远影响,为揭示地球系统的演变做出贡献。我们与欧美多国海洋地球物理与物理海洋学家合作,开展地震海洋学多个方面的研究工作,本书总结了 7 年多来开展地震海洋学研究的粗浅认识。

1.1 地震学与海洋学的交叉学科

根据大百科全书的分类,地球科学包括固体地球科学、海洋科学、大气科学、空间科学与水文科学等学科。固体地球科学三大基础分支学科是地质学、地球物理学与地球化学;海洋科学的四大基础分支学科是物理海洋学、海洋地质与地球物理学、海洋化学与海洋生物学。地球物理学与物理海洋学交叉形成地球物理海洋学,目前为止发展的分支学科是地震海洋学。顾名思义,地震海洋学是用地震学方法研究物理海洋学问题的一门新兴交叉学科(图 1.1,图 1.2)。

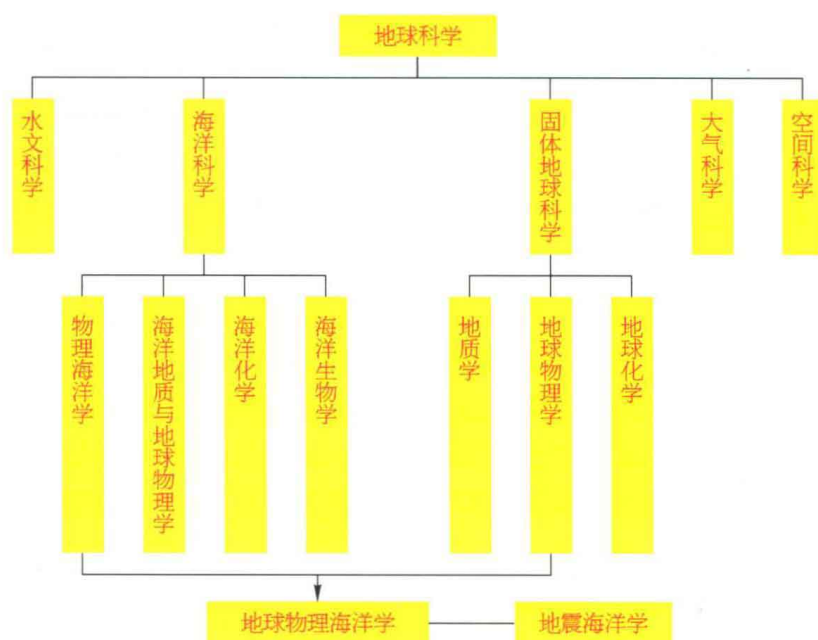


图 1.1 地球科学的主要学科体系

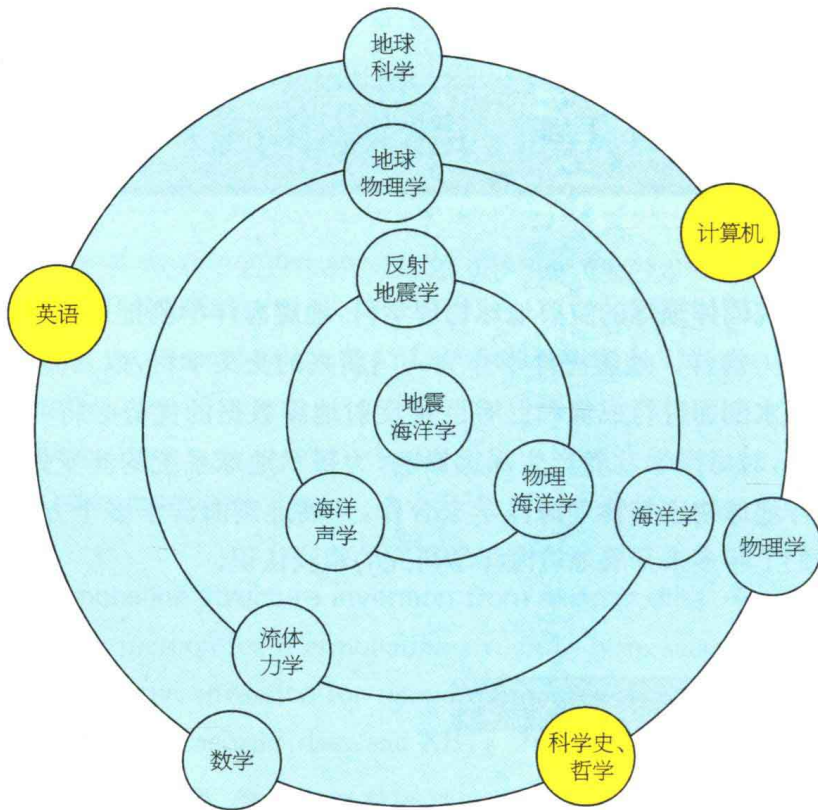


图 1.2 地震海洋学研究用的知识格架

众所周知,地震学是地球物理学的重要分支,对地球内部的圈层结构(地壳、地幔、地核)的认识主要来自地震学的认识,此外其应用学科——勘探地震学在油气勘探等领域作用巨大,发展迅猛,多年来勘探地震学中发展最快的是反射地震学,有人甚至说,没有反射地震学,就没有现代油气工业。由于大量的人力、物力投入,反射地震学已成为一门名副其实的高科技。海洋反射地震则是在海域进行地震勘探的一种方法,在调查研究海底构造、地壳结构、沉积物分布,探查油气、天然气水合物等资源方面应用广泛。在 2003 年之前,反射地震主要研究海底下的地层结构,海底以上的地震信号被认为是噪声,在最终的地震剖面绘制前对海底以上的地震信号进行切除(Muting、归零)。Holbrook 等在 2003 年 *Science* 上发表的论文开启了地震海洋学研究的大门,多国海洋地球物理学家与物理海洋学开展合作,其中以欧盟 2006—2009 年的地球物理海洋学项目影响最大,2008 年国际上第一届地震海洋学会议在西班牙召开,2009 年《地球物理研究快报》(GRL)出版地震海洋学专辑标志着地震海洋学进入了一个迅猛发展的阶段。我们有幸于 2004 年 9 月 3 日进入该领域研究,并参与了欧盟项目申请、被邀请参加了欧盟的地球物理海洋学项目、西班牙地震海洋学会议,与众多的国际同行一起进行创新研究,2007 年以来在国内宣传地震海洋学,得到多位物理海洋学家的鼓励、帮助与支持,2011 年得到了国内第一笔经费(国家自然科学基金面上项目)的支持。2012 年国家基金委批准 4 个地震海洋学研究相关项目。本书总结我们 7 年多来的研究认识,希望能起到抛砖引玉的作用,成为国内外同行开展地震海洋学研究的一本参考书。

1.2 地震海洋学研究早期进展

海洋反射地震勘探方法是用来对海底以下的固体地球进行勘探。其基本原理是人工震源激发的地震波在波阻抗界面形成反射波,为一系列检波器所接收,并由地震仪记录下来。反射地震记录内包含着多种信息,其中反射波的旅行时间和偏移距(震源到检波器之间距离)的关系,称为时距曲线。用时距曲线可反演出地下反射界面的几何形态(地质构造);而在地震反射信息中,还包含有地震波的振幅、相位、频率、速度、极性以及其他一些参数,表现出反射波的动力学特点,它能给出地层岩性的特征。

可以看出,传统的地震数据处理没有考虑海水层反射的地震波信息。而2003年Holbrook成功地用这部分反射波数据揭示了海水的温盐细微结构。较传统接触式测量技术,低频海洋反射地震技术存在着明显的优点,包括高的横向分辨率、短时间内对整个海洋剖面进行成像等。为了得到反映海水温盐细微结构的地震剖面,必须对原始地震数据进行一系列的加工处理。采用加载观测系统、反褶积、抽取道集、速度分析、动校正、叠加、滤波等一系列的处理流程,得到地震叠加剖面。叠加剖面能快速而有效的反映海水的温盐几何结构。对地震反射信号进行偏移处理可以使反射波归位、绕射波收敛,得到偏移剖面,此剖面比叠加剖面能更加准确的反应海水温盐性质的几何结构。结合地震测线上或附近的XCTD数据或XBT数据,可以验证地震剖面 and 海水温盐细微结构的一致性。

地震海洋学主要包括研究地震剖面所反映的温盐几何结构、反演海水温盐参数的振幅分析技术(如AVO方法)以及一些特殊而关键的地震数据处理技术(如直达波去除)。这一节我们将从这三个方面详细论述地震海洋学的早期发展。关于海洋反射地震勘探的数据采集、处理和解释等基本方法技术,留待下一章进行详细的讨论。

1.2.1 地震海洋学研究现状

2003年,Holbrook等(2003)在*Science*发表有关反射地震方法应用于海水温盐细结构研究的论文,该研究对横跨北大西洋洋流(NAC)的三条反射地震测线进行了数据处理,获得了揭示海水层细结构的地震叠加剖面;并利用反射系数推算出了海水层之间的温度差异,估算其温度分辨率为 0.1°C ;还对叠加剖面进行分析,发现北大西洋洋流(NAC)和拉布拉多寒流(LC)海洋锋处海水混合及交换过程所表现的细结构,并发现了至少4种反射层类型(Holbrook et al., 2003)。之后,Nandi等(2004)对挪威海一条剖面进行反射地震成像,结合35个测点的XBT数据和2个测点的XCTD数据,研究表明地震叠加剖面 and 温度剖面有很好的的一致性,指出低频反射地震技术能够探测温度小到 0.03°C 的细微结构,对水团(大西洋暖流和挪威海深层冷水)边界也有很好的刻画。Tsuji等(2005)对位于日本四国Muroto半岛附近的黑潮进行了研究;Holbrook等

(2005)利用叠加剖面对挪威海进行了内波研究,并计算了水平波数能量谱。

1. 利用反射地震勘探方法研究海洋锋处的温盐细结构

Holbrook 等(2003)成功的利用常规海洋反射地震勘探方法对纽芬兰大滩附近的北大西洋海水温盐细结构进行了研究。海面温度(SST)测量显示该海域存在着拉布拉多洋流(LC)与 NAC 相汇形成的海洋锋。该处水团之间存在着强烈的热盐侵入和因速度剪切引起的湍流,温盐细结构非常发育(Holbrook et al. , 2003)。

在此次海洋反射地震勘探中,震源采用 20 个气枪组成的子阵列,大小为 140 L。接收拖缆长 6 000 m,道间距为 12.5 m;信号的采样间隔为 4 ms,频率范围为 10~100-Hz,峰值频率为 40 Hz。数据处理采用与常规反射地震勘探类似的方法,包括直达波去除、速度分析、滤波以及共中心点叠加,最后得到了令人惊奇的反映海水细结构的地震叠加剖面。图 1.3 是测线 1 mcs 的叠加剖面 and 叠加速度剖面。从 SST 曲线可以看出,在 CMP 号为 69500 的海面温度有约 5 °C 的跳跃,这里便是 LC 和 NAC 形成的海洋锋(Holbrook et al. , 2003)。

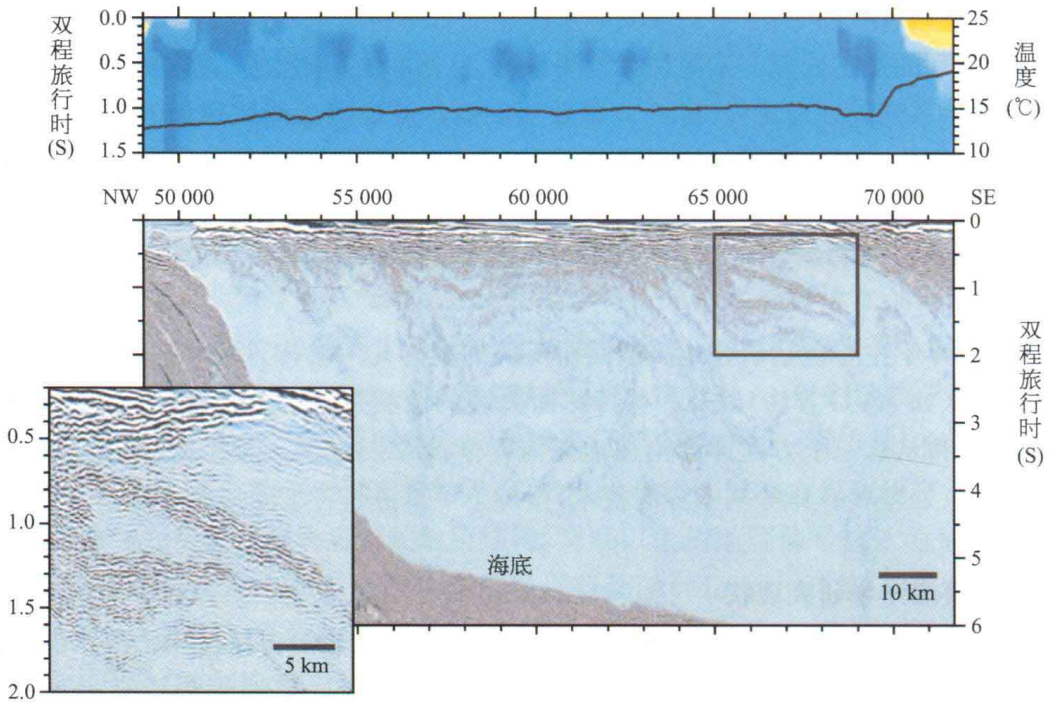


图 1.3 叠加剖面 and 叠加速度剖面 顶图表示叠加速度,它近似于声波的均方根速度,其中暖色代表高速(最大速度约为 1 530 m/s),冷色代表低速(最小速度约为 1 440 m/s),黑线为 SST 曲线;底图是测线 1 mcs 的叠加时间剖面,图像的垂直尺度扩大了 16 倍,左下图为剖面小方框部分的放大显示(Holbrook et al. , 2003)。

常规低频海洋反射地震技术能够对海洋锋处的温盐细结构进行精细成像。只要海水层厚度不小于 5 m、横向连续几百米以上,它就能很好的用于遥测温盐细结构。与传统接触式测量技术相比,低频海洋反射地震技术存在着明显的优点,包括高的横向分辨率(道间距 6.25 m)、短时间内对整个海洋剖面进行成像和能够得出反映细结构的三维或时

移图像。这种方法突破了传统测量方法在时空分辨率上的限制,为研究物理海洋过程增添了非常有前途的新方法(Holbrook et al., 2003)。

2. 利用反射地震勘探方法刻画水团边界

Nandi 等(2004)结合稠密的温盐深测量,对挪威海水团边界进行了地震海洋学研究。震源信号由 6 个 22 L 气枪组成的子阵列产生,炮间距为 37.5 m。接收拖缆共 480 道,长 6 000 m;信号的采样间隔为 2 ms,频率范围为 20~100 Hz,主频为 50 Hz。在地震反射信号采集的同时,用 35 个 XBT 和 2 个 XCTD 抛弃式测量仪以平均 5 km 的水平空间间隔对海水进行了温盐深性质的测量。其研究区域的海水主要由北大西洋暖流(NwAC)和挪威海底层冷水(NSDW)组成(Nandi et al., 2004)。

图 1.4 为研究区的地震叠加剖面 and 海水温度分布图。可以看出,叠加剖面 and 温度分布具有很好的 consistency,叠加剖面显示的反射体类型和 XBT / XCTD 测量的水团结构相吻合,在两个水团之间的边界对应着强烈的地震反射。

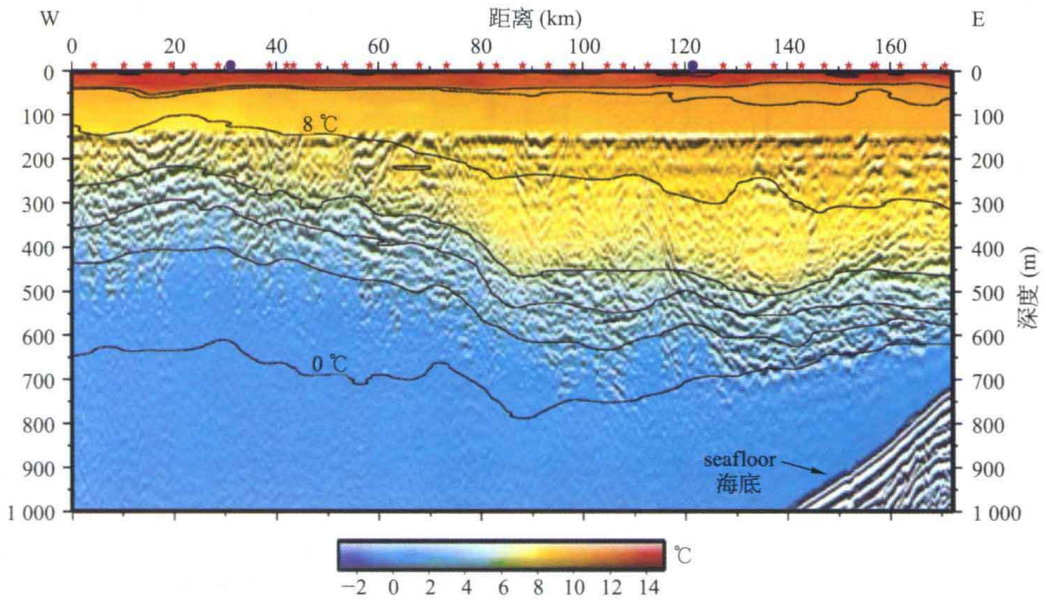


图 1.4 叠覆温度数据的地震剖面图 其中彩色代表温度,黑色代表地震数据,细的实线代表等温线(间隔为 2 °C);剖面上部的红星号和蓝圆圈号分别代表 XBTs 和 XCTDs 的位置。最上部 140 m 的地震剖面因直达波干扰而被切除,但是在约 160~215 m 深度上气泡脉冲仍然可见(Nandi et al., 2004)。

为了更好地比较温度细结构和反射层的对应关系,Nandi 等采用了波数范围从 $1/35 \text{ m}^{-1}$ 到 Nyquist 波数的梯形高通滤波器对温度数据进行滤波。滤波后的温度数据去除了大于地震信号主波长的信息。剩余短波长的温度细结构与地震剖面的反射层相吻合(图 1.5):地震振幅的正极值、负极值,分别与温度的急剧增加、减小相对应。XCTD 剖面显示温度细结构的垂直间隔约为 5~15 m。滤波后的 XCTD 数据能够揭示温度差异大到 0.23 °C 的细结构,但是大多数细结构的温差要小于这个值。在 700 m 到 800 m 的海深,一些值得注意的低振幅反射层对应着很小的温度变化。例如,770 m 深的反射层对

应的温度变化只有 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。说明反射地震勘探在探测海水细结构的温度差异上,可以有小到 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的灵敏度。反射地震勘探方法不仅能够揭示海洋锋处的温盐细结构,还能够很好地刻画水团边界。Nandi 等(2004)的研究证实了反射地震剖面能够分辨温度差异小到 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的海水细结构,而且为我们提供了一个刻画水团边界温盐细结构的新方法。

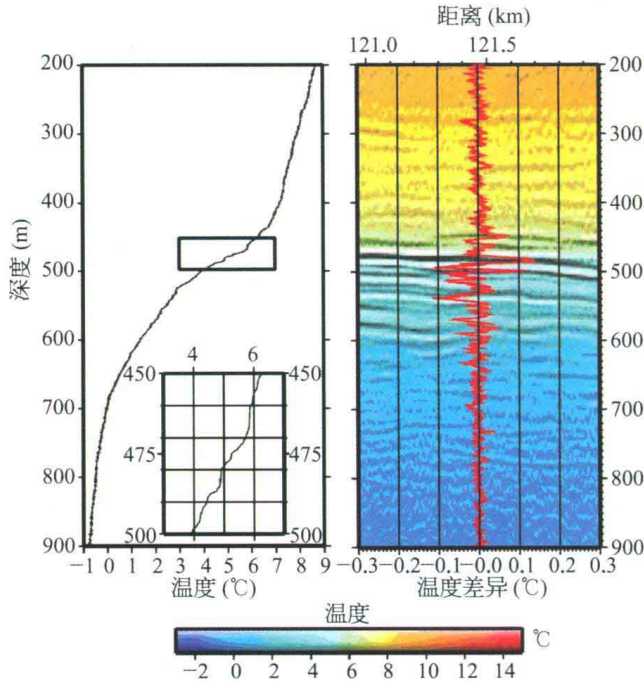


图 1.5 叠加剖面与温度差异的一致性(Nandi et al. , 2004)

3. 利用反射地震勘探方法研究黑潮的细结构

Tsuji 等(2005)对 1999 年 6—7 月在日本四国室户(Muroto)半岛附近采集的 81 条平行测线(间隔 100 m)的地震数据进行了二维地震处理研究。Tsuji 等(2005)把 81 条地震剖面看作是同一剖面,认为各地震剖面反映的温盐结构差异不是因为测线位置不同而是时间不同造成。经过对每个测线的叠后时间偏移剖面的对比研究,发现它们的形态结构非常类似,并得出结论这些温盐细结构能够稳定持续至少 20 天的时间。他们还用足折(Ashizuri)半岛附近 1994 年 9 月观测的 CTD 数据以及经验公式,推算出海水的密度和声波波速,进一步计算出它的反射系数;反射系数与 35 Hz 的 Ricker 子波褶积,得出了观测点海水的合成地震图(图 1.6)。与偏移剖面对比,结果发现这两者很相似(Tsuji et al. , 2005)。

Nakamura 等(2006)对黑潮延伸处的海洋锋进行了反射地震和物理海洋的联合勘探。较前人的不同是:在反射地震勘探中,他们在其中一条测线(共两条测线)分别采用了三种不同大小的气枪(20 L、9 L 和 3.4 L)来激发震源;在物理海洋探测中,不仅用 XBT 和 XCTD 测量了研究区域的温盐深性质,还利用多普勒海流剖面仪(ADCP)和抛弃

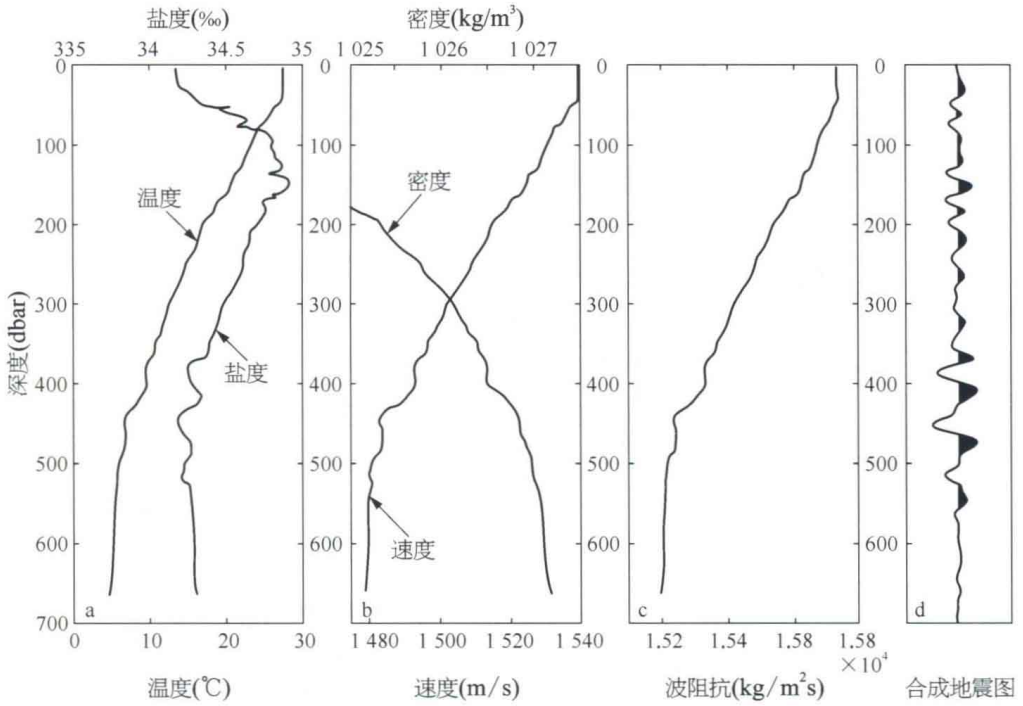


图 1.6 利用 CTD 数据计算理论地震图(Tsuji et al. , 2005)

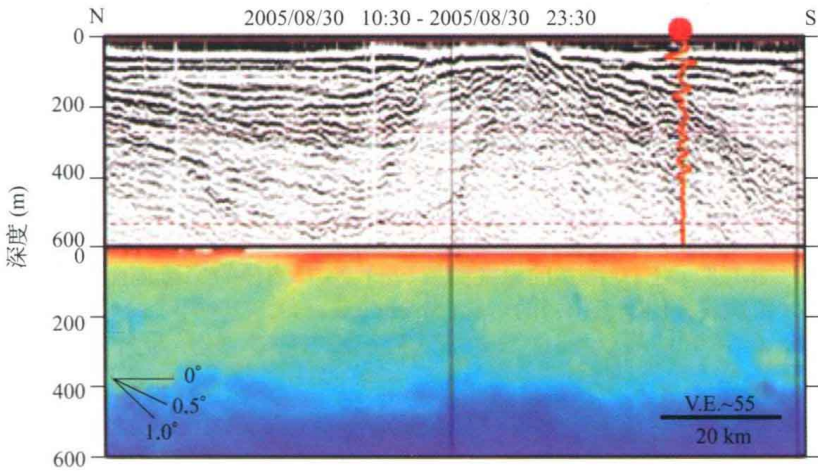


图 1.7 叠加剖面与散射强度 上图为测线 1 的叠加剖面, 红线代表 XCTD 测量的温度曲线; 下图 ADCP 在对应位置测量的散射强度图(Nakamura et al. , 2006)。

式海流剖面仪(XCP)对此区域的海流状况进行了观测。图 1.7 是测线 1 的叠加剖面(气枪大小为 9 L)和 ADCP 测量的散射强度图。Nakamura 等(2006)认为 ADCP 强度图和地震叠加剖面的差别主要是由于声源的频率不同造成,前者为 78 kHz,而后者小于 100 Hz。频率不同将导致空间分辨率、信号的衰减和对细结构的灵敏度的不同。ADCP 方法对散射体(如浮游生物等)非常敏感,而地震叠加剖面则反映海水波阻抗的变化。ADCP 强度

图并不能代表海水的温盐细结构,而是反映由不同水团中的浮游生物和悬浮物质形成的密度变化(Nakamura et al., 2006)。

图 1.8 是对 XCTD 测量的温度、XCP 测量的海流方向和叠加剖面的比较。显示在深度 200 m 以上的海水主要向北运动;而这以下的海水主要向南运动。Nakamura 等(2006)认为海流方向的极性变化在叠加剖面上对应于黑潮暖水团和亲潮冷水团的边界。在这种边界,两种水团的交错混合将是海水温盐细结构形成的重要原因。Nakamura 等(2006)还对三种不同气枪的地震叠加剖面进行了比较,发现它们非常相似,但是由于震源的能量和产生信号的波形不同造成剖面的细节稍微有些差别。例如,20 L 的气枪能产生能量较大的地震信号,可以刻画较小的波阻抗变化,但是大振幅的气泡脉冲降低了数据的信噪比。而另一方面,3.4 L 的气枪只能产生能量较小地震信号,但是有助于研究被气泡脉冲干扰的海水温盐结构的细节(Nakamura et al., 2006)。

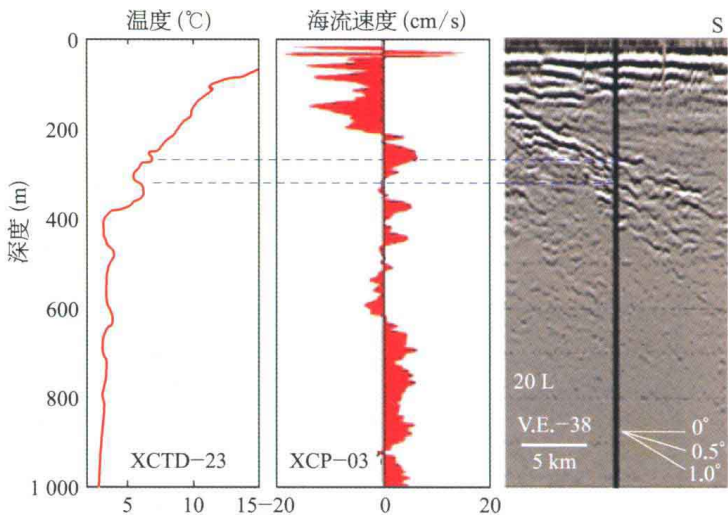


图 1.8 XCTD 测量的温度曲线(左)、XCP 测量的流速剖面(中)和地震叠加剖面(右)的对比(Nakamura et al., 2006)

4. 利用反射波同相轴的起伏变化研究海洋内波

Holbrook 等(2005)对挪威海两条地震测线(测线 30、31)的叠加剖面进行了研究分析,发现剖面上所有反射波同相轴都存在着波长从几十米到几千米,振幅几十米的类似正弦波的轻微波动。排除了其他可能性之后,他们认为这种波动是由周围内波场引起的细结构变形。Holbrook 等(2005)提取出基本上平行于温跃层的部分反射波同相轴,对其起伏变化进行分析处理,计算出了内波的水平波数能量谱,结果显示与内波 GM76 模型谱很吻合(图 1.9)。并进一步揭示在靠近陆坡的地方,内波能量较大;在远离陆坡的地方,由于能量谱进入湍流惯性副区,谱斜率发生了变化,近似为 $-5/3$,与经典的 K41 湍流理论(局地均匀各向同性湍流统计理论)相一致。这样便证明了反射地震方法能够定量遥测海洋的内波场(Holbrook et al., 2005)。

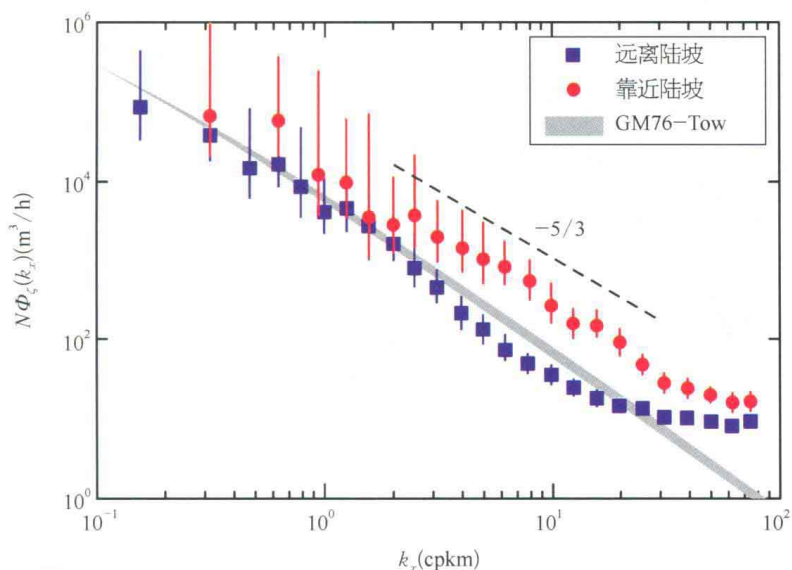


图 1.9 内波的水平波数能量谱(Holbrook et al., 2005)

5. 利用 AVO 技术研究海水的物性差异

AVO(Amplitude Versus Offset)技术通过分析研究振幅随偏移距的变化规律,揭示地层之间的物性差异。Zoeppritz 方程定量的给出了反射系数与入射角、界面上下纵、横波速度以及密度的关系。由于地震的横波不能在液体中传播,所以方程可得到很大简化。

Paramo 和 Holbrook (2005)对挪威海地震数据的两个 CMP 道集(图 1.10)进行了 AVO 分析。对预测曲线和观测曲线进行比较,选取最佳拟合曲线所对应的海水声速差异,利用声速的经验关系最终求取出了海水层的温度差异。计算结果显示 CMP6665 道集上,深度位于 0.62 s 的声速差异为 -6 m/s,温度差异为 -1.46 °C;CMP23503 道集上,深度位于 0.55 s 的声速差异为 -1.20 m/s,温度差异为 -0.30 °C。而 XCTD 在两个对应点测量的温度差异值分别为 -1.50 °C 和 0.3 °C,与 AVO 方法预测的温度差异非常吻合。这说明 AVO 技术是研究海水温度差异精确而有力的工具(Paramo and Holbrook, 2005)。

