

黄兴辉,宋海斌,Luis M. Pinheiro 等.利用反射地震数据和 XBT 数据联合反演海水的温盐分布.地球物理学报,2011,54(5):1293~1300,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.018

Huang X H, Song H B, Luis M. Pinheiro, et al. Ocean temperature and salinity distributions inverted from combined reflection seismic and XBT data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(5):1293~1300, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.018

利用反射地震数据和 XBT 数据联合反演 海水的温盐分布

黄兴辉^{1,2},宋海斌^{1*},Luis M. Pinheiro³,拜 阳^{1,2}

1 中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院油气资源研究重点实验室,北京 100029

2 中国科学院研究生院,北京 100049

3 CESAM and Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, 3800 Aveiro, Portugal

摘 要 利用地震数据反演海水的温盐分布是地震海洋学研究的一个重要方向.本文分析了采集于伊比利亚半岛西南缘海域的 GOLR12 低频地震数据和同步观测的 XBT(eXpendable BathyThermograph)、CTD(Conductivity-Temperature-Depth)资料,将叠后约束波阻抗反演方法应用到海水温度、盐度剖面的计算当中,计算结果显示这种反演方法可以提供水平分辨率为 6.25 m 的温度和盐度资料,温度的精度约为 0.16 °C,可以为物理海洋学研究提供高横向分辨率的基础数据.

关键词 地震海洋学,叠后反演,温盐分布,地中海涡旋

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.018

中图分类号 P738, P631

收稿日期 2010-11-02,2011-05-06 收修定稿

Ocean temperature and salinity distributions inverted from combined reflection seismic and XBT data

HUANG Xing-Hui^{1,2}, SONG Hai-Bin^{1*}, Luis M. Pinheiro³, BAI Yang^{1,2}

1 Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 CESAM and Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, 3800 Aveiro, Portugal

Abstract Seismic oceanography has been widely used to detect many kinds of oceanographic features as a new oceanographic prospecting method. Inversion for temperature and salinity distributions from seismic data is a very important research field in seismic oceanography. We analyzed low frequency seismic data from one multichannel seismic (MCS) line acquired in the scope of the European GO Project (line GOLR-12) combined with the simultaneously acquired XBT (eXpendable BathyThermograph) and CTD (Conductivity-Temperature-Depth) data, which are located to the southwest of the Iberian Peninsula. We used a post-stack constrained impedance inversion method to derive temperature and salinity distributions of sea water and the result

基金项目 国家自然科学基金(41076024)、国家基础研究发展规划项目(2011CB403503)和欧盟 NEST(New and Emerging Science and Technology)项目(FP6-2003-NEST 15603).

作者简介 黄兴辉,男,1985年生,博士生,主要从事海洋地球物理研究. E-mail: huangxh@mail.iggcas.ac.cn

* **通讯作者** 宋海斌,hbsong@mail.iggcas.ac.cn

demonstrated that this method can indeed provide reliable temperature and salinity distribution profiles every 6.25m along the seismic line, with the temperature resolution of 0.16°C. This method applied to good quality MCS data can provide high lateral-resolution temperature and salinity profiles for oceanographic research, using only a few oceanographic measurements to constrain the inversion procedure.

Keywords Seismic oceanography, Post-stack inversion, Temperature and salinity distribution, Meddy

1 引言

海洋反射地震学作为一种有效的勘探手段已具有几十年的应用历史. 它利用表面激发的地震波在向下传播的过程中遇到波阻抗界面而反射回来被检波器接收到的信号, 通过特定的处理流程获得探测区域的构造、物性信息. 过去勘探的兴趣主要集中在海底以下, 而忽略了海水层的反射. 最近, Holbrook 等^[1]研究发现地震剖面上的浅层海水反射反映了海水层温盐细结构, 可以利用反射地震方法研究海水的温盐特征, 从而诞生了一门新学科——地震海洋学^[2]. 传统的物理海洋学观测手段以定点观测为主. 虽然这类观测数据在垂向上具有较高分辨率, 但受观测条件限制, 其横向采样间隔往往很大, 一般为 5~50 km. 因此, 插值得到的二维剖面的精度较低, 无法详细地反映海水的横向变化. 此外, 采集一个站位的温盐数据需要较长的时间, 当海水流动性强时只能得到‘改变了’的数据^[3]. 与其相比, 地震海洋学具有高横向分辨率和短时间测量的优势(典型的水平采样率为 10 m 的数量级, 采样时间间隔远小于常规物理海洋学观测手段, 一般为几秒), 因而被越来越多的物理海洋学家所接受. 目前, 地震海洋学已经在探测涡旋、内波、海洋锋等海洋学现象方面取得了良好的应用效果^[4~8].

利用地震数据反演海水温度、盐度等物理海洋学参数是地震海洋学研究的一个重要方向. 早期的地震海洋学研究主要集中在在水团边界的刻画^[9,10]和直接从地震数据分析水体反射边界形状等定性研究方面, 而很少研究物理海洋学参数的反演. Nandi 等^[9]利用 XBT(抛弃式温度测量仪)、XCTD(抛弃式温盐深测量仪)测量的海洋学数据和地震数据联合研究表明: 地震剖面上的反射同相轴与温盐细结构具有很好地相关性, 定量研究表明, 地震反射同相轴可以反映 0.03°C 的温度变化, 且预期利用地震剖面可以得到高精度的温度空间分布. Tsuji 等^[11]的研

究也表明了地震剖面可以很好地反映出黑潮的细结构, 通过振幅对比可以得出温度的变化大约为 1°C. 这些方法描述性的部分大于定量的研究, 但是也说明温度是可以通过地震数据反演出来的. Paramo 等^[12]利用 AVO 方法分析了挪威海的温度梯度; Wood 等^[13]将全波形反演方法应用于合成地震记录和实测地震资料, 显示出良好的应用效果. 但这些研究都局限在一维. 最近, Papenberg 等^[14]利用 GO(地球物理海洋学项目)数据反演了海水温度、盐度分布, 结果表明具有很高的精度, 并且能够很好地刻画温盐细结构. 我们利用 GO 低频地震数据和同步观测的 XBT、CTD(温盐深测量仪)资料进行了叠后联合反演, 结果显示反演数据很好地刻画了观测海域的温度和盐度分布, 温度精度可以达到约 0.16°C.

2 地震数据

为了建立地震数据与物理海洋数据之间的校正基准, 推进地震海洋学进一步的发展与完善, 2006 年欧盟启动了大型的地震与物理海洋联合调查项目 GO(Geophysical Oceanography), GO 项目以 Cadiz 湾为研究区, Cadiz 湾发育有丰富的海洋学现象. 高温高盐的地中海水从直布罗陀海峡流出后沿着伊比利亚半岛南缘流动, 在葡萄牙南部遭遇 Portimao 峡谷后会产主地中海涡旋, 涡旋从主流上分离出来, 在平衡深度沿着陆坡运动^[14]. 2007 年在 Cadiz 湾进行了为期两个月的联合调查. 主要的调查数据包括: 高频、中等频率和低频的地震剖面总计 40 多条; 实时观测的 XBT 数据 500 多个剖面, CTD 资料 43 个剖面, 其中 XBT 的型号为 T5, 观测深度为 1830 m, CTD 的观测深度为 2000 m^[15]. 调查期间, 地震数据和海洋学数据多次捕捉到地中海涡旋.

分析其中的低频地震剖面 GOLR12, 其采集参数为: 震源激发系统采用容量为 1500L 的 BOLT 枪阵, 激发带宽为 5~60 Hz, 激发深度为 11 m, 炮间距为 37.5 m. 记录系统采用 2400 m 长的 SERCEL

水听器,采集深度为 8 m,道数为 192,道间距为 12.5 m,近炮检距为 84 m. 与这条剖面同步观测的 XBT 数据有 24 个剖面,CTD 有两个剖面. 测线位置和 XBT、CTD 位置如图 1 所示.

GO 项目 GOLR12 测线保幅处理以后的叠加剖面如图 2 所示,被用于联合反演. XBT 测量的数据为温度数据,缺少盐度数据. 为了解决这个问题,我们利用整个观测区域的 CTD 资料线性拟合出随深度变化的温盐关系,由此得出每个 XBT 处相应的盐度数据,为反演做准备.

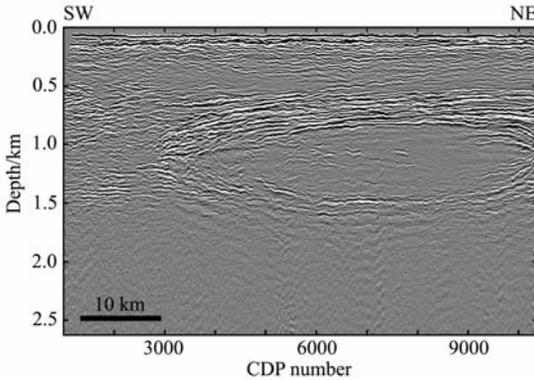


图 2 地中海涡旋的地震反射图像

Fig. 2 Seismic reflection image of a meddy (Mediterranean eddy)

3 反演温度和盐度

利用地震数据和海洋学数据联合反演海水温度和盐度分布的过程分为两个部分:第一,波阻抗或声速的反演;第二,利用声速数据同时得到温度和盐度分布. 波阻抗剖面的反演方法为叠后约束反演,这项技术已经比较成熟,在生产中得到广泛应用,许多软件都含有这个模块. 我们使用的是 Geoview 软件中的 STRATA 模块,反演方法为基于模型的反演,该反演方法力求建立与实际数据相匹配的简单模型. 首先利用 24 个 XBT 温度数据和根据温盐关系计算出来的盐度数据,通过海水状态方程计算出声速和密度数据作为“约束井”,然后利用地震记录和约束井建立初始的波阻抗模型,通过不断地修改波阻抗模型,使正演的地震记录与实际的地震记录达到最佳吻合,从而得到最终的反演结果. 反演的流程为:输入约束井资料;导入地震数据文件;提取地震子波,这里使用的方法为统计性子波提取方法;解释地震层位或导入解释好的地震层位,我们解释了 427 条同相轴用于构建初始模型;作井相关并利用约束

井提取子波. 必须要作井相关,因为地震数据和 XBT 测量垂向起始位置不一致;建立初始模型并进行反演.

反演得到的结果为波阻抗,也可以直接输出声速,此时 STRATA 通过 Gardner 公式求得密度:假定声速和密度满足: $\rho = a \times v^b$, ρ 为密度, v 为声速, a, b 为待定系数,利用约束井资料,通过最小二乘法求得,然后利用得到的密度求取声速. 这样做有一定的风险,可能会增加声速的反演误差. 但是,由于海水的密度随空间分布变化一般不大,研究表明密度差异对反射系数的相对贡献只有 5%~10%^[16],因此,这样做引入的误差是可以接受的. 我们采用的是直接输出声速的方式,反演得到的声速分布如图 3 所示. 也导出了波阻抗,再根据密度随深度的变化关系计算了声速,结果表明二者差别很小.

利用声速剖面计算温度和盐度剖面也是非常重要的工作. 这个过程我们通过迭代的方式实现. 具体实施过程中我们用到了海水声速和温度、盐度、深度关系式^[11]:

$$v = 1492.9 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2}(T - 18)^2 + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + Z/61$$

其中, v 为声速,单位为 m/s; T 为温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; S 为盐度,单位为 psu; Z 为深度,单位为 m.

迭代的过程为:假定初始的盐度值为 36 psu,带入上述方程可以解出温度值,然后利用温盐关系式得出新的盐度值,利用更新的盐度值重新计算温度值,直到温度、盐度收敛. 由于温度和盐度变化范围都很小,因此这种方法是收敛的. 计算的温度和盐度分布如图 4、图 5 所示.

4 结果分析与讨论

从地震剖面(图 2)上可以看出,地震反射同相轴主要集中在深度为 600~1500 m 的区域,这些同相轴勾画出清晰的透镜状结构. 反演的声速、温度和盐度剖面上显示透镜状结构区具有高速、高温、高盐的特征,我们认为这部分水团具有明显的地中海水团特征,而透镜状结构则可以解释为地中海水团形成的涡旋. 强烈的反射出现在水团边界,声速、温度和盐度剖面上相同的区域显示出明显的细结构,说明在地中海水团和大西洋海水之间存在着强烈的混合作用,这些区域温度和盐度变化剧烈,温盐梯度很大,也说明这里存在着强烈的物质和能量的交换. 地

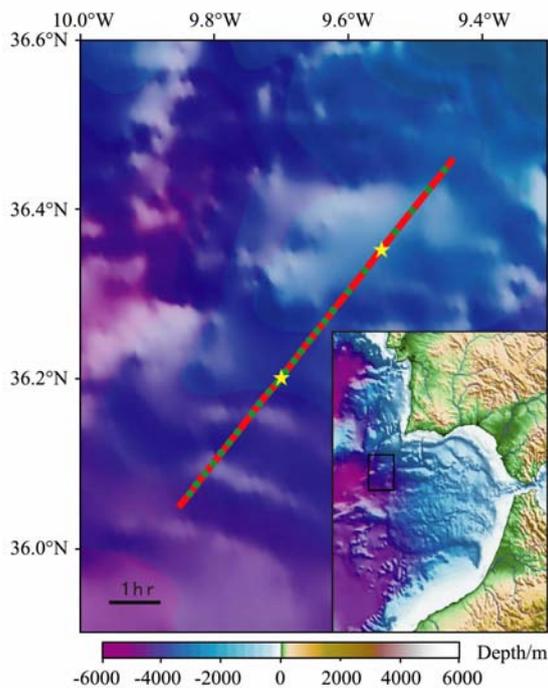


图1 观测海域的海底地形和地震测线 GORL-12, XBT、CTD 测站位置
红线为地震测线,绿色圆点为 XBT 测站,
黄色五角星为 CTD 测站.

Fig. 1 Seafloor topography in the study area and locations of the seismic line GORL-12, XBT, CTD
The red line represents the seismic line, the green solid points represent XBT measurements, and the yellow stars represent CTD locations.

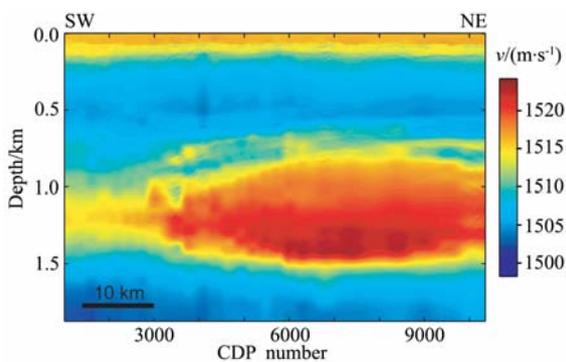


图3 反演得到的声速分布图

Fig. 3 Inverted velocity distribution derived from the inversion procedure with the unit of m/s

中海水团和大西洋海水内部反射不明显,但也存在着弱的反射同相轴,说明水团内部也不是非常的均匀,存在着温度、盐度细结构。

反演的温度、盐度、速度和 XBT 测量的温度以及通过温盐关系计算出的盐度、计算的速度的对比如图 6、图 7、图 8 所示。从图中可以看出反演结果和测量结果在低频部分吻合很好,高频部分则存在一

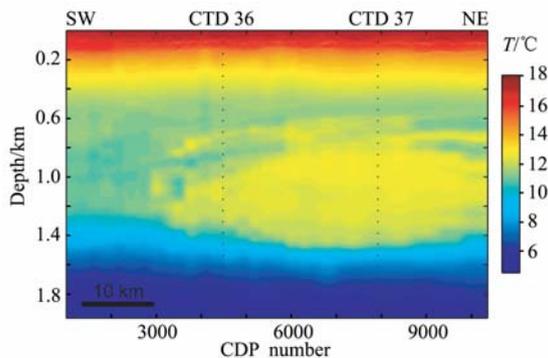


图4 反演得到的温度分布图
点线为 CTD 位置

Fig. 4 Inverted temperature distribution
Dot lines represent locations of CTD

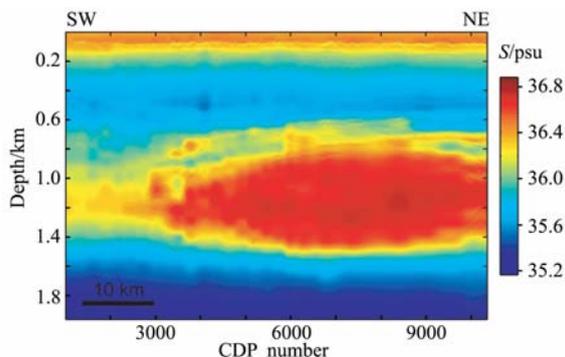


图5 反演得到的盐度分布图

Fig. 5 Inverted salinity distribution

定的差别。定量的计算表明,温度反演的均方差约为 0.16 °C;盐度反演的均方差约为 0.04 psu。考虑到温度和盐度的变化范围,盐度的反演效果不如温度,这是可以理解的,因为:首先有研究证明,盐度差异对反射系数的相对贡献只占大约 20%^[16],远低于温度差异对反射系数的贡献,也即反射系数对盐度的变化不如对温度的变化敏感;另一个可能的原因就是反演中用到的盐度约束条件来自于平均的温盐关系,这也导致了反演结果的误差。

图 6、7、8 同时给出了反演结果的均方差随深度方向的分布,从图中可以看出比较大的误差主要集中在约 100 m 处、600~800 m 处以及 1400~1600 m 处。约 100 m 处的误差可能来自于去除直达波对振幅造成的影响,属于数据处理带来的误差,发展专门的数据处理技术对减弱这类误差有帮助。而 600~800 m 处和 1400~1600 m 分别对应了涡旋的上边界和下边界,如图 9 所示。这里存在强烈的水团混合和能量交换,平均的温盐关系可能在这些区域并不适用而导致反演的误差较大。

两条同时测量的CTD剖面并没有被用于约束

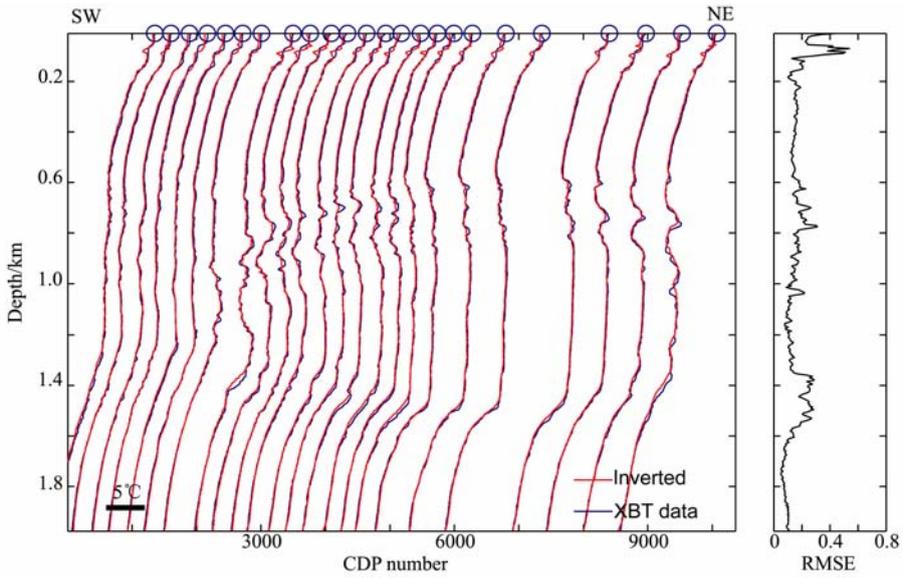


图 6 XBT 实测温度剖面 and 反演的温度剖面

其中蓝线为实测数据,红线为反演数据.右边为随深度分布的均方差,单位为 $^{\circ}\text{C}$.

Fig. 6 Inverted and XBT temperature distribution

Blue lines represent XBT data; red lines represent inverted data. The right panel is RMSE (root mean square error) in depth with the unit of $^{\circ}\text{C}$.

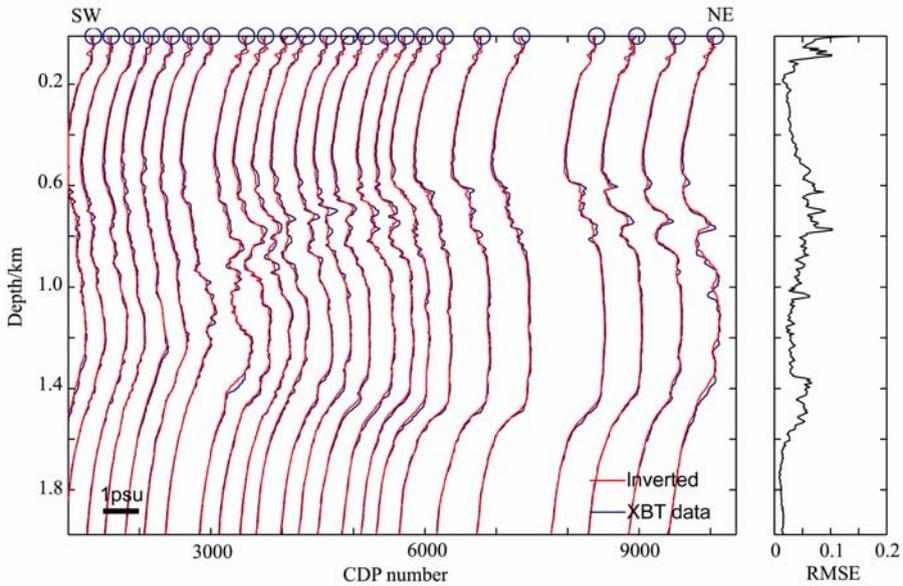


图 7 XBT 站位根据温盐关系计算得到的盐度剖面 and 反演的盐度剖面

其中蓝线为 XBT 站位根据温盐关系计算得到的数据,红线为反演数据.右边为随深度分布的均方差.

Fig. 7 Inverted and XBT-derived salinity distribution

Blue lines represent XBT-derived data from temperature and salinity relationship; red lines represent inverted data. The right panel is RMSE in depth.

反演.在这里我们将它们用于与反演结果进行对比,如图 10 所示.

从图中可以看出,反演结果和CTD测量结果的差别也主要集中在高频部分.计算表明,反演温度的均方差约为 0.26°C ,盐度的均方差约为 0.07psu ,略大于 XBT 的计算结果,这是由于 CTD 探测时间

较长,而反射地震快速探测,两者的时间并不对应,体现出海洋细结构的快速变化.

从以上对比结果来看,虽然反演结果很好地表现了温盐分布以及细结构,但是仍然存在着一一定的误差,我们认为产生这种误差的可能原因如下:第一,地震数据处理过程引入的误差.去除直达波和滤

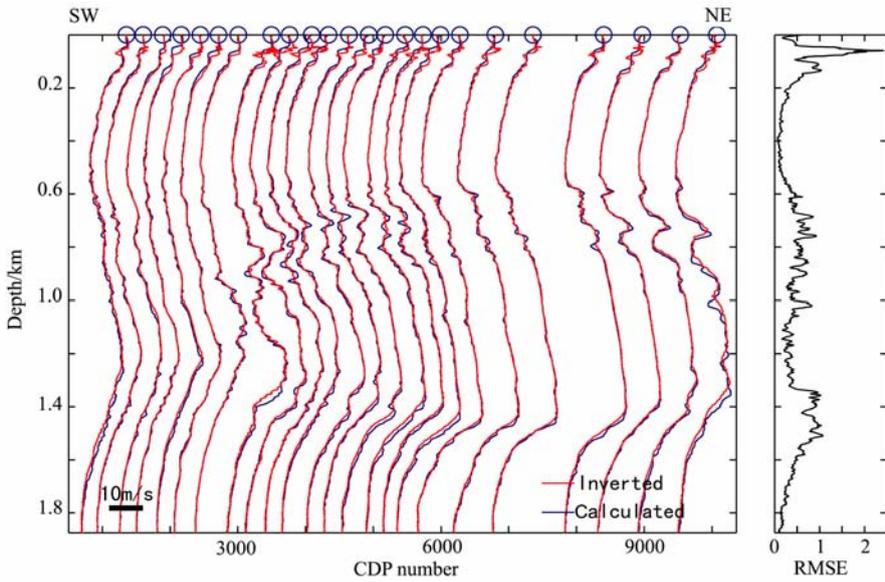


图 8 计算的速度剖面 and 反演的速度剖面

其中蓝线为计算数据, 红线为反演数据. 右边为随深度分布的均方差, 单位为 $(m \cdot s^{-1})$.

Fig. 8 Inverted and calculated velocity distribution

Blue lines represent calculated data; red lines represent inverted data.

The right panel is RMSE in depth with the unit of m/s .

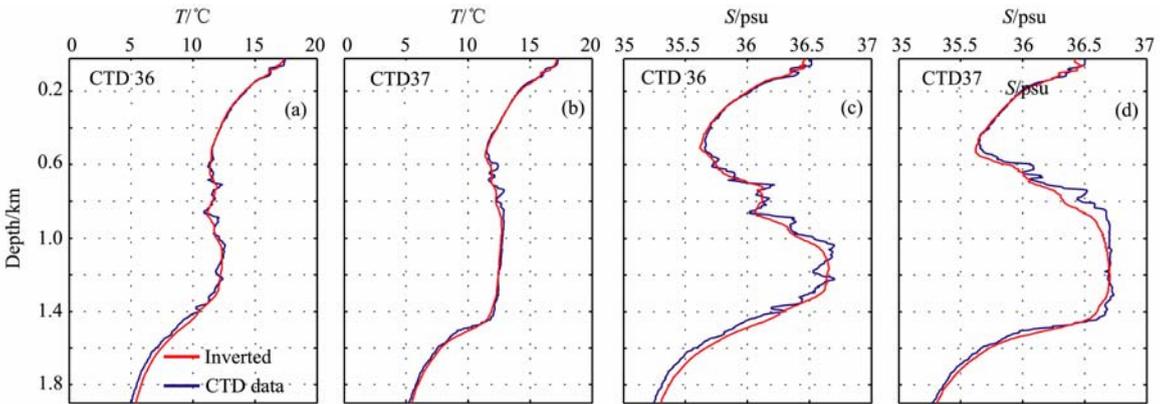


图 10 CTD 实测温盐剖面 and 反演的温盐剖面

其中蓝线为实测数据, 红线为反演数据.

Fig. 10 Inverted and CTD temperature and salinity distributions

Blue lines represent CTD data; red lines represent inverted data.

波过程都会对信号形状和振幅造成一定的影响, 声速的不准确也会影响地震数据的处理结果; 第二, 温度、盐度变化剧烈的地方, 温盐关系比想象的复杂, 使用平均的温盐关系计算很难得到精确的结果; 第三, 使用的低频地震数据主频比较低, 地震信号不能够分辨低于 15 m 的细结构.

Papenberg 等人的反演结果显示, 温度和盐度的反演精度分别可以达到 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 0.1 psu ^[14], 而我们的温度和盐度的反演精度分别约为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 0.04 psu . 注意到 Papenberg 等人得到温度和盐度的方法为利

用地震数据反演的高频数据加上 XBT 测量的低频数据的结果, 或者说他们给出的误差基本上等同于利用地震数据反演出的温盐分布的高频部分, 因此反演结果具有很高的精度. 但是他们并没有给出在没有 XBT 约束的地方的反演精度, 这是不完整的. 我们利用联合调查数据进行了反演, 总体而言, 反演结果与 XBT 较一致. 有了地震同相轴的约束, XBT 测站之间的部分同样可以得到较高的反演精度, 因而反演可给出水平分辨率为 6.25 m 的温度、盐度数据, 可用于小尺度物理海洋现象进一步分析.

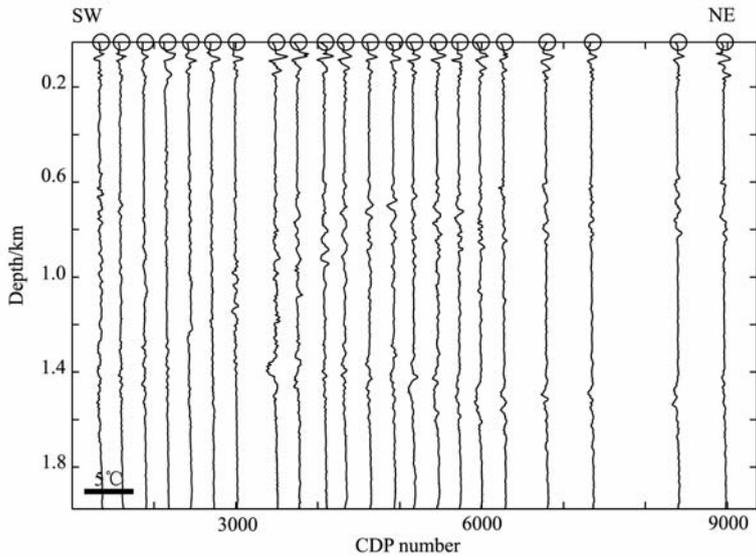


图9 XBT 实测温度和反演温度之差

Fig. 9 The difference between inverted and XBT temperatures

5 结 语

物理海洋学的研究建立在大量的观测数据基础上. 由于其传统的观测手段横向分辨率较低、观测时间间隔较大, 因此, 很难得到中小尺度的温盐细结构. 地震海洋学弥补了这一不足, 使短时间内对整个海域成像成为可能, 并且具有很高的横向分辨率. 早期研究表明, 地震海洋学能够很好地刻画海洋内部海水水团边界, 并且指出地震剖面上反射振幅的大小表征了温盐梯度强弱. 本文中, 对 GOLR12 低频地震数据进行了分析, 结合同步观测的 XBT 数据和 CTD 数据, 利用叠后约束反演方法给出了研究海域的温度剖面 and 盐度剖面, 误差分别为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 0.04 psu , 表明地震剖面可以被用来提取二维的温盐分布, 为物理海洋学研究提供了高横向分辨率的基础数据. 受到地震数据质量、数据处理流程和研究海域温盐分布的复杂程度等因素的控制, 反演的精度可能会有差异, 但是可以预期的是, 随着地震海洋学的不断发展, 它将会在物理海洋学研究中扮演越来越重要的角色.

致 谢 本工作中用到的地震数据和海洋学数据是 GO 项目的一部分, 该项目得到欧盟项目 GO(15603) (NEST), 英国自然环境研究理事会 (NERC) 和德国 DFG(KR 3488/1-1) 的支持. 感谢 GO 项目 Richard Hobbs 博士与 Dirk Klaeschen 博士允许我们使用反射地震与海洋学联合调查数据.

参考文献 (References)

- [1] Holbrook W S, Paramo P, Pearse S, et al. Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic Reflection Profiling. *Science*, 2003, **301**: 821~824
- [2] Ruddick B, Song H B, Dong C Z, et al. Water column seismic images as maps of temperature gradient. *Oceanography*, 2009, **22**(1): 192~205
- [3] 宋 洋, 宋海斌, 陈 林等. 利用地震数据反演海水温盐结构. *地球物理学报*, 2010, **53**(11): 2696~2702
Song Y, Song H B, Chen L, et al. Sea water thermohaline structure inversion from seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(11): 2696~2702
- [4] 宋海斌, 董崇志, 陈 林等. 用反射地震方法研究物理海洋-地震海洋学简介. *地球物理学进展*, 2008, **23**(4): 1156~1164
Song H B, Dong C Z, Chen L, et al. Reflection seismic methods for studying physical oceanography: Introduction of seismic oceanography. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(4): 1156~1164
- [5] 董崇志, 宋海斌, 郝天珲等. 南海东北部海洋内波的反射地震研究. *地球物理学报*, 2009, **52**(8): 2050~2055
Dong C Z, Song H B, Hao T Y, et al. Studying of oceanic internal wave spectra in the Northeast South China Sea from seismic reflections. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(8): 2050~2055
- [6] 宋海斌, Luis Pinheiro, 王东晓等. 海洋中尺度涡与内波的地震图像. *地球物理学报*, 2009, **52**(11): 2775~2780
Song H B, Luis Pinheiro, Wang D X, et al. Seismic images of ocean meso-scale eddies and internal waves. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(11): 2775~2780
- [7] 宋海斌, 拜 阳, 董崇志等. 南海东北部内波特征——经验模态分解方法应用初探. *地球物理学报*, 2010, **53**(2): 393~

400

- Song H B, Bai Y, Dong C Z, et al. A preliminary study of application of Empirical Mode Decomposition method in understanding the features of internal waves in the northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(2): 393~400
- [8] Pinheiro L M, Song H B, Ruddick B, et al. Detailed 2-D imaging of the Mediterranean outflow and meddies off W Iberia from multichannel seismic data. *Journal of Marine Systems*, 2010, **79**:89~100
- [9] Nandi P, Holbrook W S, Pearse S, et al. Seismic reflection imaging of water mass boundaries in the Norwegian Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L23311, doi: 10. 1029/2004GL021325
- [10] Nakamura Y, Noguchi T, Tsuji T, et al. Simultaneous seismic reflection and physical oceanographic observations of oceanic fine structure in the Kuroshio extension front. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 2006, L23605, doi: 10. 1029/2006GL027437
- [11] Tsuji T, Noguchi T, Niino H, et al. Two-dimensional mapping of fine structures in the Kuroshio Current using seismic reflection data. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L14609, doi:10. 1029/2005GL023095
- [12] Paramo P, Holbrook W S. Temperature contrasts in the water column inferred from amplitude-versus-offset analysis of acoustic reflections. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L24611, doi:10. 1029/2005GL024533
- [13] Wood W T, Holbrook W S, Sen M K, et al. Full waveform inversion of reflection seismic data for ocean temperature profiles. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**, L04608, doi: 10. 1029/2007GL032359
- [14] Papenberg C, Klaeschen D, Krahnemann G, et al. Ocean temperature and salinity inverted from combined hydrographic and seismic data. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**, L04601, doi:10. 1029/2009GL042115
- [15] Hobbs R, et al. GO-Geophysical Oceanography: A new tool to understand the thermal structure and dynamics of oceans. 2007, D318 Cruise Rep., Durham Univ., Durham, U. K. (Available at <http://www.dur.ac.uk/eu.go/cruise/report.html>)
- [16] Sallares V, Biescas B, Buffett G, et al. Relative contribution of temperature and salinity to ocean acoustic reflectivity. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L00D06, doi: 10. 1029/2009GL040187

(本文编辑 汪海英)