

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,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.017

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,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.017

利用地震数据反演海水温盐结构

宋 洋^{1,2},宋海斌^{1*},陈 林^{1,2},董崇志^{1,2},黄兴辉^{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

摘 要 利用地震剖面获取海水层温度、盐度、密度等物理参数成为地震海洋学研究的一个重要问题.本文提出了以 CTD(Conductivity-Temperature-Depth)温盐深剖面仪观测资料为约束的波阻抗、温-盐结构反演方法.该方法包括两个步骤:首先把少量的 CTD 作为“约束井”进行地震数据的波阻抗反演;然后利用从 CTD 资料获得的研究海区的温-盐关系式,结合波阻抗数据反演得到温度和盐度剖面.通过合成数据的试算表明,基于少量的 CTD 资料控制,利用地震数据可以反演得到高分辨率的二维温度、盐度结构.基于地震数据的温-盐结构反演方法有望弥补传统物理海洋学观测方法的不足,为海洋学研究提供大量的基础数据,有广泛的应用前景.

关键词 地震海洋学,CTD 约束地震反演,波阻抗,温度,盐度

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.017

中图分类号 P315,P738

收稿日期 2009-11-11,2010-09-21 收修定稿

Sea water thermohaline structure inversion from seismic data

SONG Yang^{1,2}, SONG Hai-Bin^{1*}, CHEN Lin^{1,2}, DONG Chong-Zhi^{1,2}, HUANG Xing-Hui^{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 Science, Beijing 100049, China

Abstract It is an important issue to quantitatively determine the parameters (temperature, salinity, density, etc) of sea water column from seismic data in seismic oceanography research. This paper presents a CTD (Conductivity-Temperature-Depth)-controlled sea-water wave-impedance and thermohaline structure inversion method, which includes two steps: (1) wave impedance inversion using CTD data as controlling wells, (2) temperature and salinity inversion based on temperature and salinity relationship of the research region from CTD data. Synthetic seismogram experiment shows that 2D high-resolution temperature and salinity profiles can be obtained from seismic data if some CTD data are used as controlling wells in the inversion process. Sea water thermohaline structure inversion method can make up for some disadvantages of conventional physical oceanography measurement method, and provide a large quantity of basic oceanographic data for ocean science studies.

Keywords Seismic oceanography, CTD-constrained seismic inversion, Wave impedance, Temperature, Salinity

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(2007CB411704)和欧盟项目(FP6-2003-NEST 15603)资助.

作者简介 宋 洋,女,1982年生,博士生,主要从事海洋地球物理研究. E-mail: songyang@mail.iggcas.ac.cn

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

1 引言

物理海洋学是海洋科学的四大基础学科之一,主要研究海洋的流体动力学和热力学过程;其研究内容包括各种时-空尺度的海水运动规律,大洋洋流、中尺度涡旋、海洋内波、水团、海水层结、热盐细结构和湍流等海洋学特征.物理海洋学在海洋资源开发、海域环境保护、海上军事活动、城市海底工程等方面均有着重要的应用.物理海洋学的发展,在很大程度上取决于观测技术的进步;物理海洋学以海水的温-盐结构为研究基础.现阶段采用的观测手段主要是利用各种仪器在海上定点观测温-盐数据,用于观测温度和盐度的精细结构的缆控式探头有CTD(C-电导率、T-温度、D-深度)和STD(S-盐度、T-温度、D-深度)等.虽然这类观测数据在垂向上具有较高分辨率^[1,2],但受观测条件限制,实际测量时(横向)采样间隔往往很大,一般横向测点间隔为5~50 km;此外,采集一个站位的温-盐数据需要较长的时间.因此当研究对象为具有强流动性的海水时,这种大间隔的测量只能通过横向插值得到二维剖面,其精度较低,无法详细地反映海水的横向变化.由此可见,仅仅利用物理海洋学的传统观测手段很难满足研究海水层温盐细结构的要求^[1,2].

近些年出现了地震学与物理海洋学的一个交叉学科——地震海洋学^[1~3].地震海洋学提供了一种非常有前途的研究手段,它利用具有较高横向分辨率的反射地震方法研究物理海洋学问题.地震海洋学的理论基础是:不同深度的海水其温度和盐度存在差异,这种差异导致海水的声波速度和密度发生变化,从而在水层间形成波阻抗界面,在海洋反射地震剖面上可清晰显示出温盐结构的细微变化引起的反射波图像.近期,地震海洋学迅猛发展,获得了揭示海水层结构的高分辨几何图像,对深入认识涡旋、内波、海洋锋等物理海洋现象起到了重要作用^[1~7].目前,利用地震剖面获取海水层温度、盐度、密度等物理参数成为地震海洋学研究的一个关键问题.2008年,Wood等^[8]利用全波形反演方法对一个CMP(反射地震处理的共中心点)道集进行了反演尝试;本文提出了以CTD资料为约束的波阻抗、温度-盐度结构反演方法.合成数据的试算表明,基于少量的CTD资料控制,利用地震数据可以反演得到高分辨率的二维温度-盐度结构.这预示着地震海洋学将提供海量的温度-盐度数据用于海洋学的

研究.

2 利用地震数据反演海水温度、盐度剖面的方法

利用地震数据反演海水温度、盐度剖面的方法包括两个步骤,首先把少量的CTD作为约束井(controlled well)进行地震数据的波阻抗反演,然后利用CTD资料获得的研究海区的温盐关系式,基于波阻抗数据反演温度和盐度剖面.

2.1 CTD资料约束的海水层波阻抗反演

本文主要利用常规油气地震勘探中经常使用的井约束波阻抗反演方法.井约束波阻抗反演方法结合了地震数据的横向高分辨率和测井数据的垂向高分辨率的优点,把井参数外推到整个地震剖面,从而使这种方法在油气储层预测中起着非常重要的作用.本文利用的海水层波阻抗反演与油气勘探中的约束波阻抗反演的区别是:前者需进行一次正演计算,基于CTD获得的温度、盐度随深度的变化数据,求得声速、密度、波阻抗随深度变化的数据;而后者不需要正演计算.

井约束波阻抗反演在油气地震勘探中是较成熟的方法,基于该方法已开发众多软件.本文主要采用Geoview软件系列下的STRATA地震反演软件进行反演处理,其核心是稀疏脉冲反演方法.该反演方法力求建立与实际数据相匹配的简单模型,利用地震记录和井资料(在本文中即由CTD资料计算获得)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.

STRATA反演海水层结构可以认为是从地震道 $T(i)$ 求反射系数 $R(j)$ 的处理过程,即利用基本的褶积模型:

$$T(i) = \sum_j R(j)W(i-j+1) + N(i), \quad (1)$$

式中 $R(j)$ 为反射系数, $W(i)$ 为地震子波, $N(i)$ 为附加噪音.

反射系数 $R(j)$ 与波阻抗 I 满足关系式:

$$R(j) = \frac{I(j) - I(j-1)}{I(j) + I(j-1)}, \quad (2)$$

地震子波 $W(i)$ 和反射系数 $R(j)$ 是波阻抗反演中两个重要的组成部分.地震子波的提取方法有两类:统计子波提取和测井子波提取方法.首先利用统计子波提取方法确定一个初步的子波,并假设子波的近

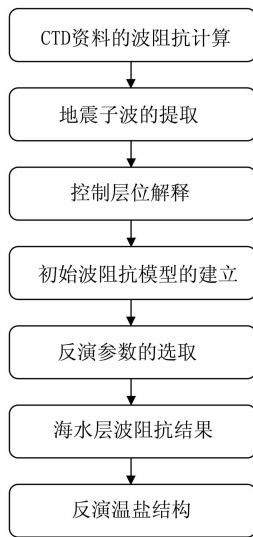


图 1 基于 CTD 约束的海水波阻抗、温盐结构反演处理流程图

Fig. 1 CTD-constrained seawater column wave impedance and thermohaline structure inversion processing flow chart

似相位确定;然后利用测井和统计方法相结合的方式确定地震子波的相位.在海水波阻抗反演中假定的测井资料为 CTD 资料合成数据,它们分别为独立的“井位”,因此 STRATA 软件在实际操作中,可以用相同的方式以外推和插值的方法建立反演模型.这种地震子波的提取方法具有较高的精确度,但在实际操作中应尽量避免走时调整和井拉伸的操作,以减少子波高频信息的丢失和相位畸变的产生.最后重复提取子波,在分析时窗里与其他道的子波相加,再计算另一道的子波,使得在与井资料有关的窗口内正演的合成地震记录与实际的地震记录达到最佳吻合,反复修改后得到的波阻抗模型就是最终的反演结果,温盐结构反演流程如图 1 所示.

2.2 基于波阻抗数据的温度和盐度剖面反演

海水层波阻抗定义为

$$I = \rho_w \cdot V_w, \quad (3)$$

式中 I 是波阻抗, ρ_w 和 V_w 分别代表海水密度和声速.

海水密度变化于 $1021 \sim 1070 \text{ kg/m}^3$ 范围内,随着深度的增加而略有增大.总体上来看,密度对阻抗差异的影响远比速度对阻抗差异的影响小;由于海水温度和盐度变化不大,因此总的来说海水层波阻抗差异较小.在海水中由于温度、盐度以及压力随位置变化,导致声波在海水中的传播速度 V_w 变化于 $1430 \sim 1550 \text{ m/s}$ 之间,与海底以下的地震波速度相比,这个变化范围是很小的;在海洋地震勘探中海水

层反射振幅较弱,常将海水视为均匀层.但是当我们以海水作为研究对象,主要研究海水的分层结构和海水的温盐结构时,这种小范围的速度变化却是不容忽略的,因此从声速的细微变化我们可以得到有关海水温度、盐度以及压力变化的重要信息.

在海洋水层的垂直水柱中,温度(T)和盐度(S)的关系主要通过分析温-盐图解得到.当 CTD 测站位置和深度不同时,温盐关系也会随之变化.通过地中海涡旋 Sharon 的 13 组 CTD 资料^[2]得到的温-盐图解,如图 2 所示.从海平面到水深 2000 m,温度范围在 $4 \sim 24^\circ\text{C}$ 之间,盐度在 $35 \sim 37 \text{ psu}$ 之间.温-盐图解呈现为一复杂的曲线.本文采用分段拟合、求解多项式的系数等方法确立温盐间的定量关系.在具体过程中分为六组:海水深度取 $400 \sim 2000 \text{ m}$ 之间,地震道共 121 道,按照如图 3 所示的深度和道数为边界,整体上分为左右两部分(第 1~60 道和第 61~121 道),左侧按海水深度 600 m、900 m、1200 m 分为三部分,右侧按海水深度 950 m 分为两部分.

利用海水密度 $\rho(S, T, P)$ 和声速 $V(S, T, P)$ 的经验公式^[9,10](4),

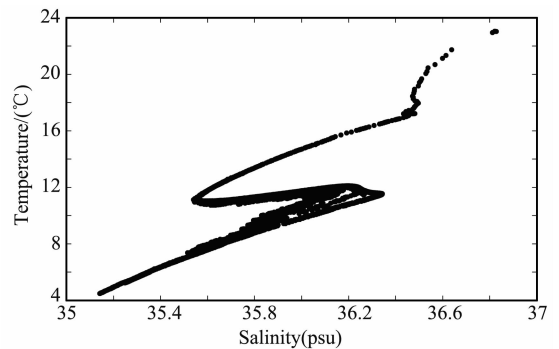


图 2 温-盐图解

Fig. 2 T-S diagram

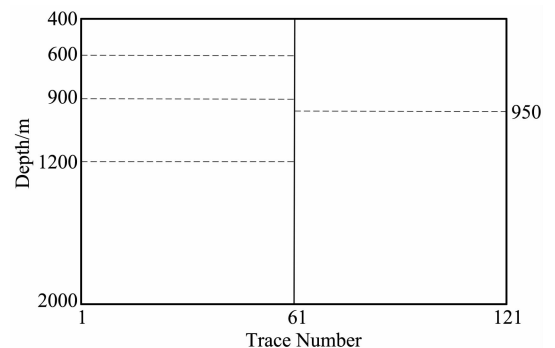


图 3 研究海区温-盐关系分块示意图

Fig. 3 Sketch map of research region for different temperature and salinity relationship

$$\rho(S, T, P) = \frac{\rho(S, T, 0)}{[1 - P/K(S, T, P)]},$$

$$V(S, T, P) = \alpha_0 + \alpha_1 S + \alpha_2 S^{3/2} + \alpha_3 S^2, \quad (4a)$$

$$K(S, T, P) = K(S, T, 0) + AP + BP^2;$$

$$\rho(S, T, 0) = \rho_w + (b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4)S + (c_0 + c_1 T + c_2 T^2)S^{3/2} + d_0 S^2,$$

$$\rho_w = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5,$$

$$K(S, T, 0) = K_w + (f_0 + f_1 T + f_2 T^2 + f_3 T^3) \times S + (h_0 + h_1 T + h_2 T^2)S^{3/2},$$

$$K_w = e_0 + e_1 T + e_2 T^2 + e_3 T^3 + e_4 T^4, \quad (4b)$$

其中 S 是盐度,单位是 psu(实用盐度标度); T 是温度,单位是 $^{\circ}\text{C}$; P 是压力,单位是 decibar(分巴); $\rho(S, T, P)$ 是海水在实用盐度 S 、温度 T 、压力 P 条件下的密度, $\rho(S, T, 0)$ 为压力为 1 个标准大气压 ($P=0$)下的海水密度; $V(S, T, P)$ 是海水在实用盐度 S 、温度 T 、压力 P 条件下的速度, $K(S, T, P)$ 是海水在实用盐度 S 、温度 T 、压力 P 条件下的正割体积模量^[11], $K(S, T, 0)$ 为 1 个标准大气压下的正割体积模量; ρ_w 是纯水密度,单位是 kg/m^3 ; K_w 是正割体积模量的纯水项; $A, B, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0, c_1, c_2, d_0, e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, f_0, f_1, f_2, f_3, h_0, h_1, h_2$ 均为给定的常数, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 是温度 T 、压力 P 的函数^[9]。

逐道地将不同深度的温盐数据转换为波阻抗,通过调整温度,使得计算的波阻抗与反演的波阻抗在最小二乘的意义下拟合误差达到最小,由此基于波阻抗数据可反演得到二维温度结构,然后根据测量海区水层中的温度与盐度的经验关系式(5),继而得到相应的盐度结构.在本文中我们假设温度、盐度满足经验关系式:

$$S = g_0 + g_1 T + g_2 T^2 + g_3 T^3, \quad (5)$$

其中 g_0, g_1, g_2, g_3 为常数,但针对海水不同区域时,有相对应的数值.

3 合成地震数据的反演试验

反演的地震数据来自 Ruddick 等^[2] 给出的地中海涡旋 Sharon 的 121 道合成地震记录(图 4).该地震记录基于 13 个 CTD 资料,求得 13 个站位的波阻抗垂向变化,并利用了 IAM5 测线处理剖面提取的地震子波,用褶积方法合成并用线性插值方法获得 121 道地震图^[2].反演中,选取 CTD126、CTD129、CTD133、CTD136 四组数据为“控制井”,CTD 测站与地震道的对应关系见表 1.

表 1 CTD 与 CMP 对应表

Table1 CTD correlation with the seismic trace number													
CTD	124	125	126	127	128	129	131	132	133	134	135	136	137
站位													
地震	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121
道号													

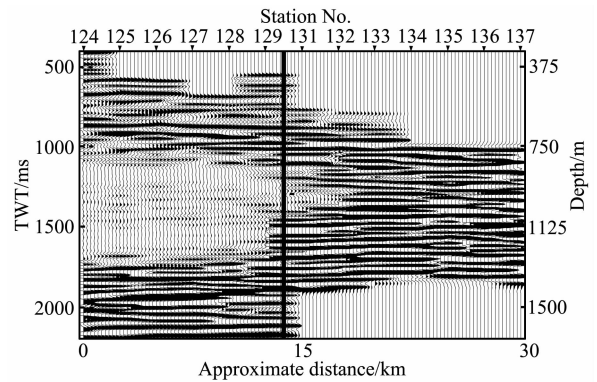


图 4 合成地震记录^[2]

Fig. 4 Synthetic seismic record^[2]

利用上节的方法反演得到二维温度结构与盐度结构剖面(图 5、图 6),海水深度范围在 400~2000 m 之间,温度范围在 4~14 $^{\circ}\text{C}$ 之间,盐度在 35~37 psu 之间.图 5 将实际观测 CTD 资料插值后的海水温度和反演得到的海水温度进行对比:从形状上看总体趋势一致,且温度的变化范围比较吻合,整体上表现为涡旋核部温度较高,周边温度相对较低,反映了涡旋核部地中海海水与周边北大西洋中层水的差异.图 6 将实际观测插值后的海水盐度和反演得到的海水盐度进行对比,总体上也较为一致,涡旋核部区域盐度较高.在反演得到的海水盐度剖面中(图 6b),在地震道第 61 道具有明显的分界线,出现这种现象的原因是:在反演过程中(如图 2T-S 图解所示),其温盐关系不能用一个三阶多项式来表达,因此实际过程中分为左右两部分(第 1~60 道和第 61~121 道)分别处理,分界线正好处于左右分界的地方.

为了进一步查验反演的结果,我们从 CTD 数据集中抽取五组数据,分别为 CTD124、CTD127、CTD128、CTD131、CTD136,将这些海水温度、盐度的观测数据与反演得到的温度、盐度数据进行对比,整体上两者拟合较好,如图 7、8 所示.以上五组 CTD 资料的起始点所处的海水深度不同,最小深度在 400~724 m 之间,最大深度在 1366~1836 m 之间,因此在将不同的 CTD 进行对比时,其有效范围是不同的.具体表现为:上、下两侧吻合程度较低,中间区域吻合程度较高.而数据 CTD131 在深度 1000~

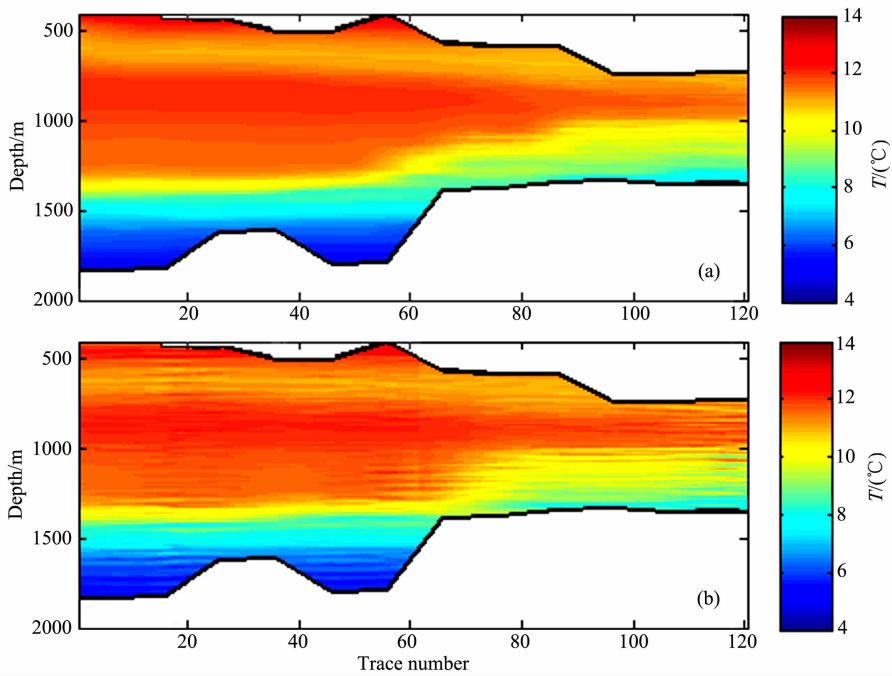


图 5 (a) 实际观测插值后的海水温度; (b) 反演得到的海水温度

Fig. 5 (a) Observed and interpolated temperature of sea water; (b) Inverted temperature of sea water

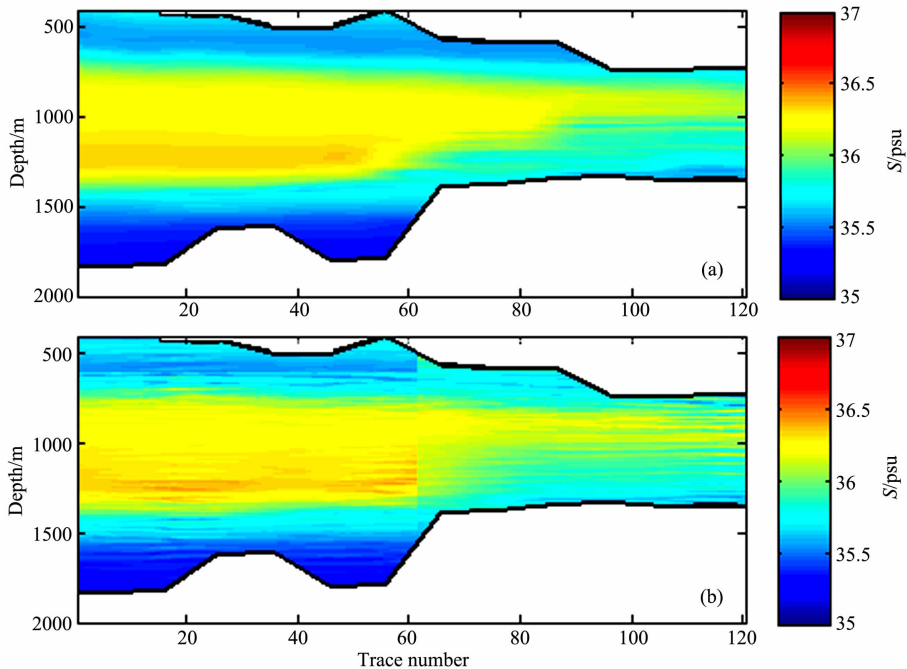


图 6 (a) 实际观测插值后的海水盐度; (b) 反演得到的海水盐度

Fig. 6 (a) Observed and interpolated salinity of sea water; (b) Inverted salinity of sea water

1400 m 反演的数据与实测数据存在一定差别,这主要与靠近温盐关系分区的交接位置有关,从而导致反演结果和实测数据存在一定程度上的差异.总的来说,通过将反演结果与 CTD 资料对比,表明反演得到的温度和盐度结果较准确,本文提出的反演方法是有效的.

4 结 语

本文利用以 CTD 观测数据(资料)约束的地震反演方法获取海水层的波阻抗、温度、盐度结构剖面.将反演的温度、盐度与 CTD 站点测量值进行对

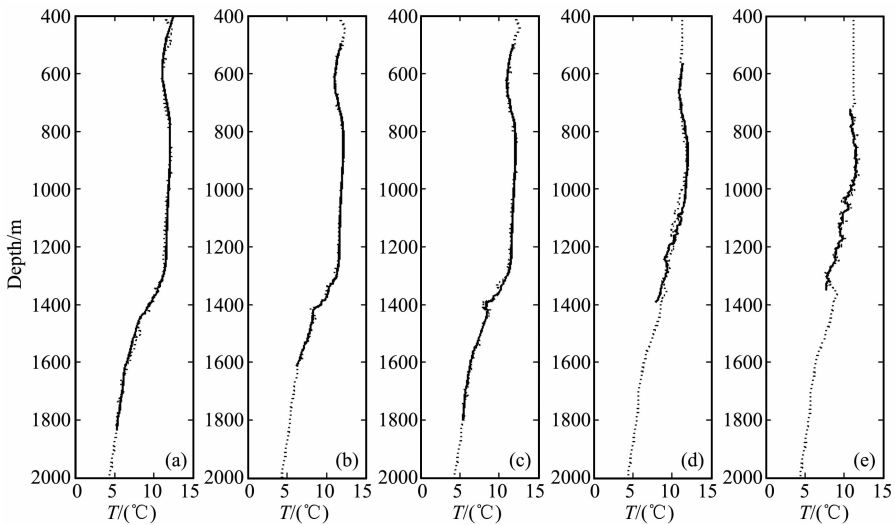


图 7 海水温度观测数据(黑线)与反演数据(黑点)对比

(a) CTD124; (b) CTD127; (c) CTD128; (d) CTD131; (e) CTD136.

Fig. 7 Comparison of observed (black line) and inverted (black spot) temperature of sea water

(a) CTD124; (b) CTD127; (c) CTD128; (d) CTD131; (e) CTD136

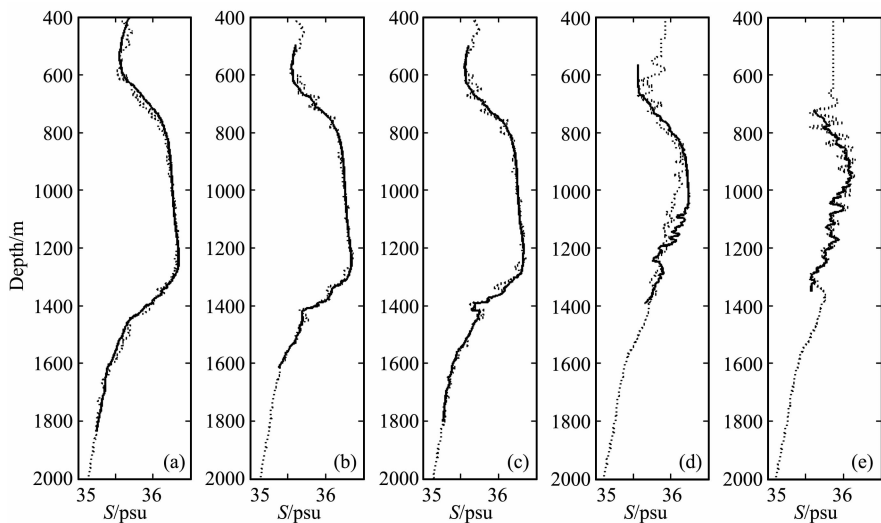


图 8 海水盐度观测数据(黑线)与反演数据(黑点)对比

(a) CTD124; (b) CTD127; (c) CTD128; (d) CTD131; (e) CTD136

Fig. 8 Comparison of observed (black line) and inverted (black spot) salinity of sea water

(a) CTD124; (b) CTD127; (c) CTD128; (d) CTD131; (e) CTD136.

比分析,显示两者吻合较好.这表明地震海洋学分析已经能够通过定量(反演)方法提取海水层的二维温盐结构,并预示着在海洋学研究中地震反演方法具有良好的应用前景.本文主要研究由 CTD 测站资料控制的波阻抗模型的建立和温盐定量关系式的应用两个方面.研究的局限性在于,反演所采用的地震数据为 CTD 合成的地震记录,由于数据所限,进行了插值处理,而在插值过程中带入了误差,因此一定程度上影响了研究结果的精度.值得注意的是海上地震勘探横向采样间隔一般为 6.25 m,远小于物理

海洋学中采用的 CTD 测量的横向间距;因此基于地震勘探数据与少量的 CTD 测站数据,利用地震反演方法研究海水的温盐结构,将会提供高横向分辨率的温度、盐度结构剖面^[12],这有望弥补传统物理海洋学观测方法的不足,为海洋科学研究提供海量的基础数据.此外应该指出,本文提出的仅是初步的温-盐剖面结构的反演方法,尚需进一步研究其中有关测量海区温-盐的“分块”处理和经验拟合表达式的选定等问题.

致谢 感谢葡萄牙 Aveiro 大学的 Pinheiro 教授、

Dubert 教授、加拿大 Dalhousie 大学的 Ruddick 教授、葡萄牙 Lisbon 大学的 Ambar 教授、Matias 教授在地震海洋学合作研究中的帮助、感谢美国 Woods Hole 海洋研究所的黄瑞新教授和中国科学院南海海洋研究所甘子钧研究员、王东晓研究员、尚晓东研究员、齐义泉研究员、周伟东研究员、詹海刚研究员等在物理海洋学方面的指点。

参考文献(References)

- [1] 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
- [2] Ruddick B, Song H B, Dong C Z, et al. Water column seismic images as smoothed maps of dT/dz . *Oceanography*, 2009, **22**(1):192~205
- [3] Holbrook W S, Paramo P, Pearse S, et al. Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling. *Science*, 2003, **301**(8): 821~824
- [4] Pinheiro L M, Song H B, Ruddick B, et al. Detailed 2-D imaging of the Mediterranean outflow and meddies of W Iberia from multichannel seismic data. *Eos Trans AGU*, 2006, **87**(36),OS13I-02
- [5] 董崇志,宋海斌,郝天珧等.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] Pinheiro L M, Song H B, Ruddick B, et al. Detailed 2-D imaging of the Mediterranean outflow and meddies of W Iberia from multichannel seismic data. *J. Mar. Syst.*, 2010, **79**: 89~100, doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.07.004
- [7] 宋海斌,Pinheiro L M,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, Pinheiro L M, Wang X D, et al. Seismic images of ocean meso-scale eddies and internal waves. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009,**52**(11): 2775~2780
- [8] 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
- [9] Fofonoff P, Millard R C Jr. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Unesco Tech Pap in Mar Sci*, 1983, (44): 1~53
- [10] Millero F J, Chen C T, Bradshaw A, Schleicher K. A new high pressure equation of state for seawater. *Deep Sea Research*, 1980, **27**: 255~264
- [11] 侍茂崇.物理海洋学.山东:山东教育出版社,2004. 22~23, 61~63
Shi M C. *Physical Oceanography*. Shandong: Shandong Education Press, 2004. 22~23, 61~63
- [12] Papenberg C, Klaeschen D, Krahmann G, et al. Ocean temperature and salinity inverted from combined hydrographic and seismic data. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**, L04601, doi:10.1029/2009GL042115

(本文编辑 胡素芳)