

郑红波, 阎 贫. 地震海洋学方法在研究南海东北部海水水体结构中的应用. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1852~1858, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.010

Zheng H B, Yan P. The application of seismic oceanography to studying ocean water mass structure in the northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1852~1858, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.010

地震海洋学方法在研究南海东北部 海水水体结构中的应用

郑红波, 阎 贫*

中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

摘 要 反射地震方法一般用于地下地质结构的探测. 本文采用南海东北部的一条地震测线记录, 通过对水体反射信号的处理, 获取了该测线上海水的声速剖面, 并获得了海水水体结构的直观图像. 在反射地震剖面上, 可以看出南海东北部上层海水结构较为稳定, 没有明显的水体侵入痕迹, 但中、深层海水中内波较为发育, 这与物理海洋学上的研究结果是一致的. 本文通过设计合理的数据模型说明了地震海洋学这种方法的可行性, 并对地震海洋学的工作方法和方向上提出了一些意见和建议.

关键词 地震海洋学, 温盐结构, 南海东北部, 内波

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.010

中图分类号 P315, P631

收稿日期 2009-09-23, 2010-07-16 收修定稿

The application of seismic oceanography to studying ocean water mass structure in the northeastern South China Sea

ZHENG Hong Bo, Yan Pin*

CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

Abstract Seismic reflection method is usually used to explore the geological structure of underground. In the paper, by processing the data of a high resolution seismic survey line in the northeastern South China Sea, we obtained the subtle velocity structure and clear reflection images of seawater mass in the survey line. From the seismic profile, we can distinguish that the thermohaline structure of upper layer seawater in the northeast South China Sea is relatively steady. There isn't obvious intrusion of other water mass. But in the middle layer seawater, internal waves can be found from the seismic profile. The result accords with the research on physical oceanography in the northern South China Sea. Additionally, a reasonable data model has been designed to prove the feasibility of the seismic oceanography method; some opinions and suggestions are given, which will contribute to future research in seismic oceanography.

Keywords Seismic oceanography, Thermohaline structure, the Northeastern South China Sea, Internal wave

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目(Kzcx2-yw-228), 国家基金(U0733003, 40876027), 973 项目(2007CB411706), 中国科学院边缘海地质重点实验室开放研究基金课题(MSGL09-13)资助.

作者简介 郑红波, 1981 生, 男, 湖北黄冈人, 硕士, 2009 年毕业于中国科学院南海海洋研究所, 现从事海洋地球物理研究.

E-mail: hongbozheng@china.com.cn

* **通讯作者** 阎 贫, 1965 生, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质与地球物理研究. E-mail: yanpin@scsio.ac.cn

1 引言

地震海洋学是利用反射地震方法研究海水水体温盐结构的新方法,它属于地球物理学和物理海洋学的交叉学科.不同深度处的海水由于温度、盐度等物性差异,造成的波阻抗差异可以产生反射波,通过反射地震方法可以获取海水的水体结构反射图像.自 2003 年 Holbrook 等在 Science 发表利用反射地震剖面研究温盐细结构的一篇文章^[1]后,一些国家的海洋地球物理学家和物理海洋学家开始在这一研究方向开展工作. Holbrook 等^[1]通过常规地震反射资料处理,清晰地显示了海水水体中的结构剖面,将反射剖面中东倾的楔形反射体解释为暖水(the North Atlantic Current)与冷水团(Labrador Current)的界线;Nandi 等^[2]在 2004 年利用常规地震反射剖面研究了挪威海的水体温盐细节结构,在反射地震剖面中可以发现叠加剖面 and 温度分布具有很好的一致性,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;目前国内也有学者开始关注利用反射地震剖面研究温盐细结构^[3,4],但还处于起步阶段.本文利用地震海洋学方法对南海东北部海域海水水体结构进行了初步的解释,并建立了合理的数值模型来说明该方法的可行性及应用范围.

不同深度海水由于温度和盐度的差异造成了波速和密度的差别,这种差别可以产生反射波,因此在反射地震叠加剖面上不同的反射层位就代表着海水中不同的密度、声速层,进而反映的是温盐结构的变化,因此可以通过反射层位的特征来解释海水的温盐结构的变化.内波是海水中常见的一种现象,它是密度稳定层结的海洋水体内部的波动^[5].其形成过程是:海水在垂直方向因温度、盐度等变化,出现明显的密度分层后,在气压变化、地震活动和船舶航行等外力扰动以及潮流和地形的作用下,就可能在海水内部的分层界面上引起内波;通常的内波,振幅为几米至几十米,波长近百米至几十千米,周期几分钟至几十小时,它是引起海水混合、形成细微结构的重要原因.在反射地震剖面上,内波的发生会造成反射层位同相轴发生小的波动或者弯曲、变形.

2 研究背景

南海是一个面积广阔的深水海盆,也是一个半封闭性的边缘海,它西面及北面与亚洲大陆相邻,南

及东南面有群岛环绕,主要通过东北面的吕宋海峡与濒临的西北太平洋相沟通.

本文所研究区域位于南海东北部,海水深度变化范围大,从沿岸的几十米到最深的马尼拉海沟 5377 m.海水表层温度基本上呈北冷南暖以及西冷东暖的分布态势,等温线大体上与海岸平行,呈东北-西南走向;盐度分布则以北部盐度值较高,向南盐度值逐渐降低.黑潮暖流带来太平洋高温高盐海水进入南海,从而导致东北部盐度和密度大^[6].

南海北部陆架陆坡海域是国际公认的内波高发地带,该海域普遍存在内波现象^[7].20 世纪八九十年代国内外的石油公司在开发南海北部的石油资源时,不仅现场观测了内波,而且体会了内波对其设备和操作过程的影响.对于南海北部内波的发源地,国内外很多学者认为是在巴士和巴林塘海峡或其中的某个局部区域.得出这样的结论主要有两方面的原因,一方面在巴士和巴林塘海峡存在急剧变化的海底地形,当来自太平洋的潮波或海流穿过海峡时,潮流或海流受海峡内的地形影响会在层化的海水中激发出内潮波或内孤立波并向南海北部传播;另一方面,在南海北部海域的陆架陆坡的连接处地形变化剧烈,且海水层化现象长年存在,因此由内潮波的生成机制可知:潮流在这里受到变化剧烈地形的强迫或调制作用后,会在层化的海水中产生扰动并最终发展成内潮波.

本文所研究的反射地震测线位于南海东北部的台西南海域,测线位置如图 1 所示,测线经东北部陆坡穿过吕宋海峡进入西太平洋.广州海洋地质调查局的“探宝”号采集船承担了本次的地震数据采集任务,数据采集时间为 2001 年 8 月.地震采集参数为:震源为 4 个 Sleeve 气枪枪阵,总容量为 3000 in³,压力 2000 PSI;放炮间距 50 m;电缆为 240 道的数字拖缆,道间距 12.5 m,最小炮检距 250 m,最大跑检距 3237.5 m;记录长度 10 s,采样率 2 ms,叠加次数 30 次.

3 数据处理与结果分析

海水水体反射的地震数据处理与针对地质目标调查的常规地震数据处理流程类似,但处理重点和参数较为不同,目标针对水体部分,主要流程包括振幅恢复、去直达波干扰、带通滤波、速度分析、叠加、偏移等流程,通过对 L973-6 测线的水体反射地震数据的处理,获取了该测线上的海水声速结构,通过与该海域的 CTD 站位测量获得的声速相比,可以发

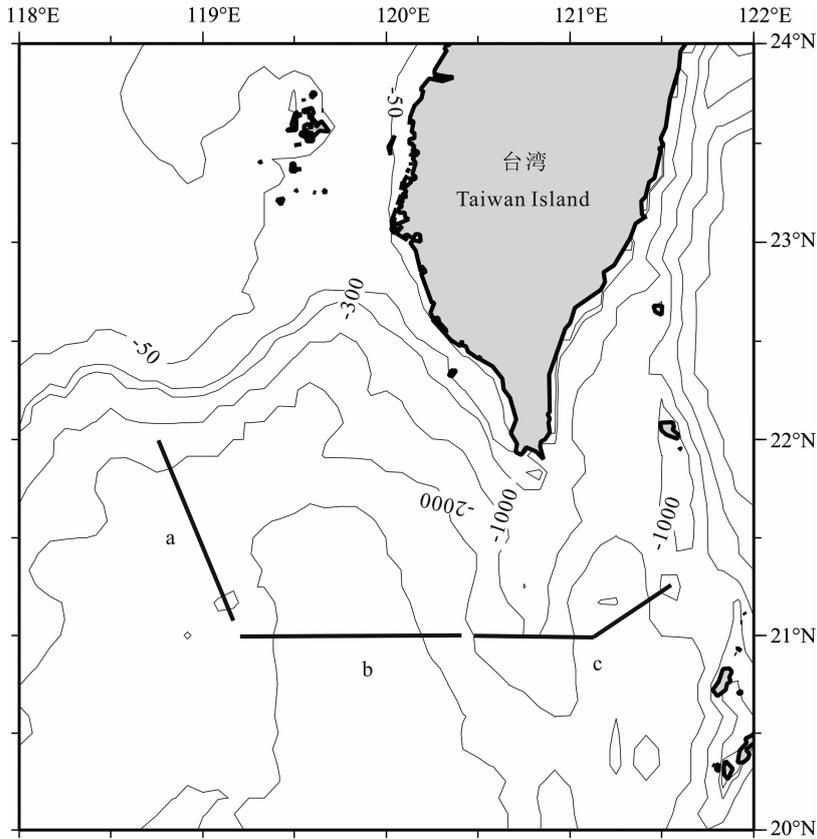


图 1 L973-6 地震测线位置图(等高线为海水深度,单位为 m;a,b,c 为测线位置)

Fig. 1 The location of MCS survey line L973-6

现反射波叠加速度谱获得的速度与海洋学的测量结果趋势一致,但也存在细节差异^[8].并最终获得了该测线的海水水体反射结构图像.

图 2~4 所示是测线上 a、b、c 段的海水反射地震剖面,从剖面中可以看出,上层反射波振幅较强,1 s 以下的反射波振幅微弱,1.5 s 以下则基本上分辨不出有效反射了.而反射层位所对应的应该是温盐结构发生变化的地方,它反映的是上部水体温盐结构变化快,下部水体的温盐结变化小.该海域夏季海水的温跃层一般集中在 150 m 以内,但在反射剖面上由于资料的缺失该层无法反映出来.从三段剖面图都可以发现上部的反射层位连续,没有明显的异常,可以看出该时刻此海域上层海水温盐结构比较稳定.

在图 2~4 剖面中大部分反射层都存在着层位的轻微波动现象,范围非常广.如方框所示为这种波动现象非常明显的区域,波长一般都达数公里,其中波长最大达 12 km,振幅达 100 多米.根据前人的研究发现:吕宋海峡在夏季有中、深层水的交换,造成水体的不稳定,并且由于此海域地形变化大,当潮流或海流穿过海峡时,潮流或海流受急剧地形的影响

会在层化海水中形成内波,从而造成此海域是海洋内波产生的高发地带.因此我们解释这些轻微的波动为内波扰动.图 4 中黑色虚线以下空白区域是由于在地震数据处理过程中切除了海底以下的地层数据造成的.

从图 2~4 所示的 a、b、c 三段反射地震剖面中可以发现,在 0.2 s 以内的浅表层几乎看不到有效反射,造成这种现象的原因是由于海水直达波及气泡效应对地震资料的干扰使得浅层处理效果较差;而在 1.5 s 以下由于反射波在深层海水中振幅较弱、信噪比较低,加之深部水体的结构较为稳定,所以也没有明显的反射层位和结构.

4 分析与讨论

在物理海洋学的研究中发现,海水的表层水(0~300 m)是发生温盐变化最为明显的区域.但在本次的反射地震剖面上发现在 0.2 s(~150 m)以上的表层几乎看不到有效反射,经过对原始海水水体反射地震数据的分析,可以确认产生这一现象的根本原因是气枪震源在激发时所形成的气泡脉冲.气

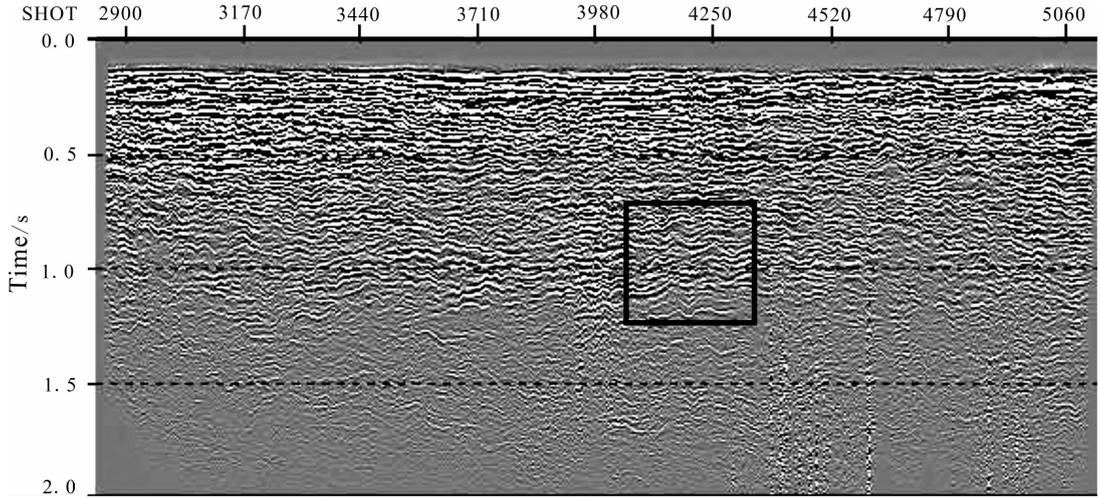


图 2 L973-6 测线 a 段所示海水水体反射地震剖面(方框指示了波动明显的层位,下同)

Fig. 2 Stacked seismic profile of water column on part a of survey line L973-6

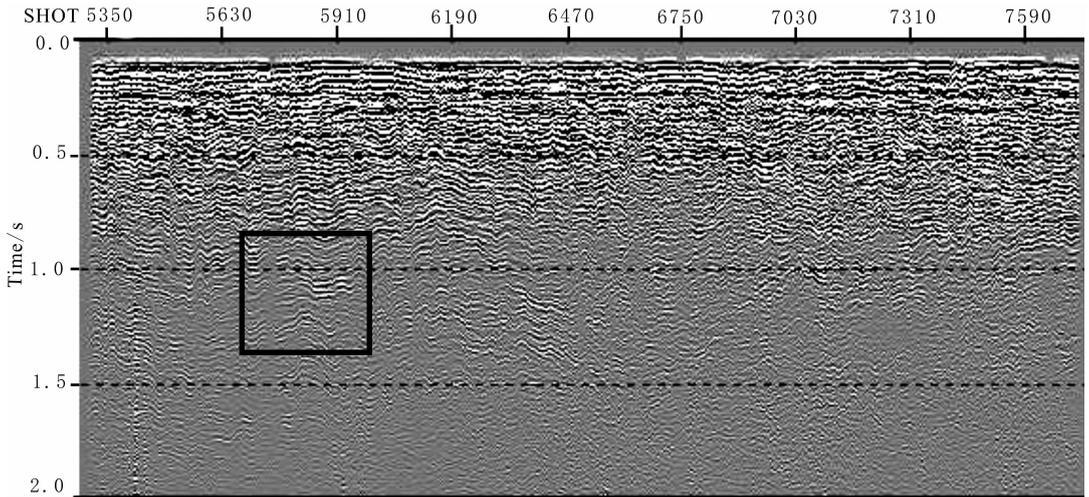


图 3 L973-6 测线 b 段所示海水水体反射地震剖面

Fig. 3 Stacked seismic profile of water column on part b of survey line L973-6

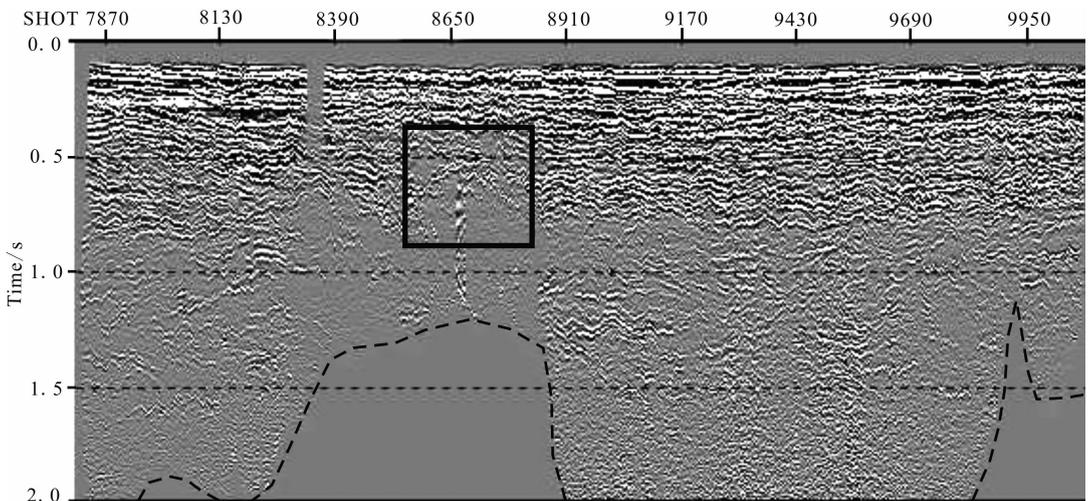


图 4 L973-6 测线 c 段所示海水水体反射地震剖面

Fig. 4 Stacked seismic profile of water column on part c of survey line L973-6

枪激发所产生的气泡脉冲振幅非常大、延续时间长,以至于浅层海水水体的有效反射完全被淹没在这些强大的气泡效应中. Nakamura 等^[9]在利用地震海洋学方法研究日本东部海域某测线进行物理海洋与反射地震联合测量时,分别采用了三种不同大小容量的气枪震源(20 L、9L 和 3.4 L),经处理后发现,20L 的气枪产生能量较大的地震信号,可以显示较小的波阻抗变化,但是大振幅的气泡脉冲降低了浅层数据的信噪比;3.4L 的气枪产生能量较小地震信号,有助于研究被气泡脉冲干扰的浅层海水温盐结构的细节. 在本文中 L973-6 测线地震数据采集的震源为 4 个 Sleeve 气枪枪阵,总容量为 3000in³(约 49L),震源产生的地震信号能量大,因此产生的地震信号气泡脉冲干扰严重,不利于研究浅层海水水体反射;并且导致地震子波的频率较低,不利于分辨率的提高. 因此,在地震海洋学的研究中,为了获取高质量的原始地震数据,震源的选择和观测系统

的设计非常关键,一般宜采用小容量的协调组合气枪阵、GI 气枪阵等震源以削弱气泡脉冲能量对浅层水体反射的影响;采用长排列、小道距的方式增加覆盖次数以提高资料的信噪比;并且在海况较好的时候组织施工以降低整个资料的背景噪音,从而达到提高原始数据质量的目的.

在海水水体反射地震记录中,除了直达波、气泡效应、突发尖脉冲等各类常规干扰外,还应考虑海底多次波的持续效应. 由于海底多次波的速度与海水水体速度相差不大,水体吸收衰减慢,可能形成规则干扰,对海水的有效波的识别非常不利,因此在处理过程中必须考虑到海底多次波对水体反射资料的影响. 另外,除了海底多次波,当地层中存在由于速度变化大造成强反射地层界面时,地质层位的长程多次波也可能形成干扰. 为此我们设计了下面的模型(图 5)来比较反射地震资料中有效水体反射与多次波的振幅,从而进一步分析多次波对水体反射波的

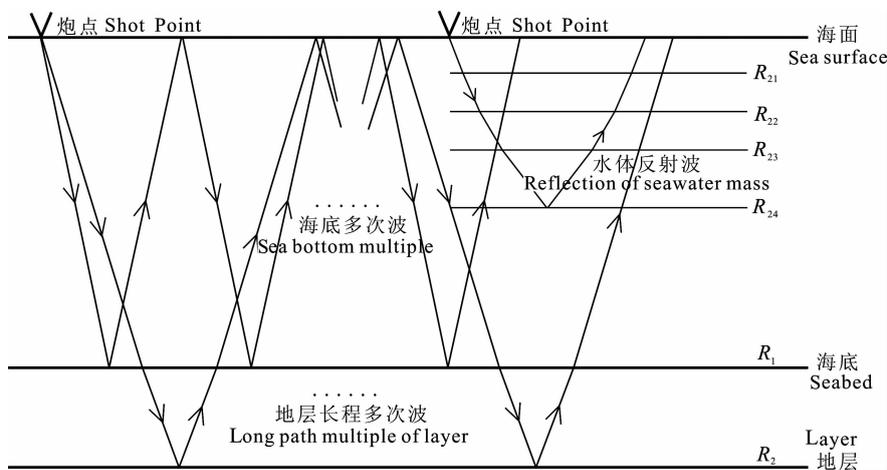


图 5 海底多次波、地层长程多次波与水体反射波示意图

Fig. 5 Diagram of sea bottom multiple, long path multiple and reflection of seawater mass

影响程度.

假设正常船速(5 节),放炮空间间隔 50 m,时间间隔约为 17 s. 另设两个水深不同的海区模型,海面到海底的双程反射时间分别为 2 s、6 s(分别为 1500 m、4500 m 的水深模型),数据记录长度为 12 s,则炮集记录中的 1.0 s 处可以记录到上一炮的海底多次波,此多次波在海面和海底之间分别经过了 9 次和 3 次反射,设此时它们的振幅分别为 A_1 、 A'_1 ,假设在 1.0 s 处刚好存在一个水体的有效反射记录,它的振幅为 A_2 ;弹性波在介质中传播振幅的衰减主要受波前扩散、介质吸收及透射损失等能量损耗因素的影响. 设炮点的起始振幅为 $A_0 = 1.0 \times 10^4$,海底层的反射系数为 R_1 ,设从海面到 1.0 s 处

有 4 个海水水体反射层,反射系数分别为 R_{21} 、 R_{22} 、 R_{23} 、 R_{24} ;地震气枪激发的声波在海水的吸收系数 α 为 4.4384×10^{-6} ,声波在海水的平均速度为 $V_0 = 1500$ m/s.

假设地层长程多次波从海面到强反射地层的双程反射时间分别为 3 s、6 s,其中从海底到强反射地层的双程反射时间都为 1 s(分别为 1500 m、3750 m 水深模型),则炮集记录中的 1.0 s 处可以记录到上一炮的长程多次波,此多次波在海面与地层之间分别经过了 6 次和 3 次反射,设此时它们的振幅分别为 B_1 、 B'_1 ,强反射地层的反射系数为 R_2 ,其他参数与图 5 模型中的一致.

则海底多次波的振幅表达式为:

$$A_1 = A_0 e^{-\alpha V_0 t_1} \frac{1}{v_0 t_1} R_1^9,$$

$$A'_1 = A_0 e^{-\alpha V_0 t_1} \frac{1}{v_0 t_1} R_1^3,$$

地层长程多次波的振幅表达式为:

$$B_1 = A_0 e^{-\alpha V_0 t_1} \frac{1}{v_0 t_1} (1 - R_1^2)^6 R_2^6,$$

$$B_1 = A_0 e^{-\alpha V_0 t_1} \frac{1}{v_0 t_1} (1 - R_1^2)^3 R_2^3,$$

水体有效反射波振幅表达式为:

$$A_2 = A_0 e^{-\alpha V_0 t_2} \frac{1}{v_0 t_2} (1 - R_{21}^2)(1 - R_{22}^2)$$

$$\times (1 - R_{23}^2) R_{24}.$$

先考虑海底多次波,此时, $t_1 = 17$ s, $t_2 = 1.0$ s, 根据卢博等^[10]对南海北部海区海底沉积物声速与密度资料的调查,海底沉积物的声速范围为 1497~1595 m/s,其对应的密度范围为 $1.48 \times 10^3 \sim 2.02 \times 10^3$ kg/m³,可以算出海底的反射系数范围为 0.1856~0.3587,此时取 $R_1 = 0.3587$;根据 Tsuji^[11]等在文章中提供的海水密度、速度资料,我们建立了 5 层层状海水水体模型,模型各参数见表 1.

表 1 层状海水水体模型参数

Table 1 The parameter of layered sea-water mass model

海水层位	海水密度 ($\times 10^3$ kg · m ⁻³)	海水波速 (m · s ⁻¹)	波阻抗 ($\times 10^6$ kg · m ⁻² · s ⁻¹)	反射系数
1	1.0245	1540	1.5773	$R_{21} = 0.006292$
2	1.0250	1520	1.5580	$R_{22} = 0.004422$
3	1.0261	1505	1.5443	$R_{23} = 0.004692$
4	1.0268	1490	1.5299	$R_{24} = 0.003148$
5	1.0272	1480	1.5203	

再考虑地层长程多次波,根据郝沪军等^[12]对南海北部潮汕凹陷构造带的研究,中生界地层顶界面为一强反射地层界面,界面以上速度为 1800~2500 m/s,界面以下速度为 2500~4500 m/s,根据 Ludwig 等^[13]文中引用的密度与速度的关系式可以算出其界面上密度为 $1.75 \times 10^3 \sim 2.11 \times 10^3$ kg/m³,界面以下的密度为 $2.35 \times 10^3 \sim 2.37 \times 10^3$ kg/m³,从而算出中生界地层顶界面的反射系数范围为 0.3381~0.4785,此时取 $R_2 = 0.4785$.

则可计算出海底多次波的振幅 $A_1 = 3.4432 \times 10^{-5}$, $A'_1 = 1.616 \times 10^{-2}$;地层长程多次波的振幅 $B_1 = 1.8395 \times 10^{-3}$, $B'_1 = 2.5381 \times 10^{-2}$;水体反射振幅 $A_2 = 2.0845 \times 10^{-2}$, $A_1/A_2 = 1.65 \times 10^{-3}$, $A'_1/A_2 = 0.78$, $B_1/A_2 = 0.09$, $B'_1/A_2 = 2.67$.

由于此模型及各参数的设置均参考实测数据,可以认为此结果能代表实际情况,由此可以看出,当海水深度较浅时,与海水水体有效反射相比,海底多次波对水体有效反射的影响可以忽略不计,地层的长程多次波对水体反射波的影响也比较小;当海水深度较大时,海底多次波和地层长程多次波都会对水体有效反射造成干扰,这种干扰会使本来就很微弱的水体有效反射信息被多次波覆盖,从而影响海水水体结构的成像.

5 结 论

本文通过对南海东北部的 L973-6 测线的地震海洋学研究,可以得出以下结论:

(1)从南海 L973-6 测线的水体反射地震剖面看,南海东北部上层海水水体结构较为稳定,但中、深层海水中内波非常发育.

(2)利用地震海洋学进行研究的前提是原始海水水体反射地震数据的质量必须高;为了获取高质量的反射地震数据,在震源的选择和观测系统的设计上需采用小容量协调组合气枪震源、小道距、长排列数字地震拖缆,并且在海况较好的时候施工作业.

(3)当海水深度不大的时候,海底多次波与地层长程多次波对海水水体有效反射波的影响很小,可以忽略不计;当海水深度较大的时候,海底多次波和地层长程多次波都会对海水水体结构的成像形成较大的干扰,不利于海水水体结构的成像.

目前国外学者在地震海洋学上的研究都是反射地震方法与常规物理海洋观测手段相结合,这样有利于两种方法在测量结果上的相互补充以及对比验证.因此建议国内的地球物理学家与物理海洋学家联合起来在南海做一次真正意义上的联合测量,为国内的地震海洋学的发展提供方向和依据.

致 谢 感谢美国 Wyoming 大学 Holbrook 教授及中国科学院地质与地球物理研究所宋海斌研究员在地震海洋学上给予的指点和帮助;感谢中国科学院南海海洋研究所物理海洋研究室尚晓东老师等在物理海洋学上的指点;感谢“探宝号”地震船全体成员为本次研究所提供的数据.

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**(8): 821~824

- [2] Nandi P, Holbrook W S, Pearse S, et al. Seismic reflection image of water mass boundaries in the Norwegian Sea. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**, L23311, doi: 10.1029/2004GL021325
- [3] 宋海斌, 董崇志. 直达波去除技术在地震海洋学中的应用. 中国地球物理年会 2007. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2007
Song H B, Dong C Z. Application of technology of removing direct wave in seismic oceanography. *The Chinese Geophysics*, Qingdao: China Ocean University Press, 2007
- [4] 董崇志, 宋海斌, 郝天璠等. 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
- [5] 冯士筭, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1999
Feng S Z, Li F Q, Li S J. *Introduction to Oceanography* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1999
- [6] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清等. 南海地质. 北京: 科学出版社, 2002
Liu Z S, Zhao H T, Fan S Q, et al. *Geology of the South China Sea* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002
- [7] 杜涛. 南海北部的内波. 地学前缘, 2007, **7**(增): 188
Du T. Internal wave in northern South China Sea. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2007, **7**(Suppl.): 188
- [8] 郑红波, 阎贫, 王彦林等. 研究海水温盐结构的反射地震方法. 热带海洋学报, 2009, **28**(1): 48~55
Zheng H B, Yan P, Wang Y L, et al. Ocean thermohaline structure from processing multi-channel seismic reflection data of ocean water mass. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2009, **28**(1): 48~55
- [9] Nakamura Y, Noguchi T, Tsuji T, et al. Simultaneous seismic reflection and physical oceanographic observations of oceanic fine structure in the Kuroshio extension front. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**, L23605, doi: 10.1029/2006GL027437
- [10] 卢博, 李赶先, 黄韶健等. 中国黄海、东海和南海北部海底浅层沉积物声学物理性质之比较. 海洋技术, 2005, **24**(2): 28~33
Lu B, Li G X, Huang S J, et al. The Comparing of seabed sediment acoustic-physical properties in the Yellow Sea, the East China Sea and northern the South China Sea. *Ocean Technology* (in Chinese), 2005, **24**(2): 28~33
- [11] Tsuji T, Noguchi T, Niino H, et al. Two-dimensional mapping of fine structures in the Kuroshio Current using seismic reflection data. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**, L14609, doi: 10.1029/2005GL023095
- [12] 郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄等. 潮汕洼陷中生界—油气勘探的新领域. 中国海上油气(地质), 2001, **15**(3): 157~163
Hao H J, Lin H M, Yang M X, et al. The Mesozoic in Chaoshan depression: a new domain of petroleum exploration. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2001, **15**(3): 157~163
- [13] Ludwig W J, Kumar N, Houtz R E. Profiler-Sonobuoy measurements in the South China Sea Basin. *Geophysical Research*, 1979, **84**: 3505~3518

(本文编辑 胡素芳)