

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, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 08. 013

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, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 08. 013

## 南海东北部海洋内波的反射地震研究

董崇志<sup>1,2</sup>, 宋海斌<sup>1\*</sup>, 郝天珧<sup>1</sup>, 陈林<sup>1,2</sup>, 宋洋<sup>1,2</sup>

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** 已有的内波研究多来自单点的垂直剖面观测资料, 但研究内波水平特征的实测资料却非常缺乏. 利用反射地震方法研究海水温盐结构, 具有高水平分辨率和短时间内对整个海水垂直剖面进行成像的优势, 能够弥补传统物理海洋学观测方法的缺陷, 为研究海洋内波提供有前景的新手段. 本文通过对南海东北部地震剖面的重新处理、分析, 认为地震叠加剖面上同相轴呈现的起伏变化反映了内波的总体形态. 计算的水平波数能量密度谱与 GM76 模型谱基本一致, 但在低波数段和高波数段中, 两者的振幅及斜率存在着一定差异, 经分析认为这种差异主要与内潮波和复杂海底地形的强烈非线性相互作用以及内波破碎等因素有关.

**关键词** 地震海洋学, 海洋内波, 内波谱, GM76 模型

DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2009. 08. 013

中图分类号 P738

收稿日期 2009-01-19, 2009-08-11 收修定稿

### Studying of oceanic internal wave spectra in the Northeast South China Sea from seismic reflections

DONG Chong-Zhi<sup>1,2</sup>, SONG Hai-Bin<sup>1\*</sup>, HAO Tian-Yao<sup>1</sup>, CHEN Lin<sup>1,2</sup>, SONG Yang<sup>1,2</sup>

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

**Abstract** Extensive researches about internal waves are mostly from vertical profile observations; however, there are rare in-situ observation data to study horizontal characteristics of internal waves. Compared with the traditional physical oceanographic methods, reflection seismology has several advantages, such as high lateral resolution and the ability of imaging a large ocean profile in short time. Therefore, it is a promising observation technique for internal wave studies, which may make up the defects of traditional observation methods. Results from the reprocessing of a long multi-channel seismic profile in the northeastern margin of the South China Sea reveal clearly coherent undulating reflectors associated with internal waves in the water column. Horizontal wave number spectra of undulating reflectors are calculated and compared with the Garrett-Munk tow spectrum of oceanic internal wave displacements (GM76 spectrum). The results show that internal wave horizontal wave-number spectra are generally consistent with the theoretical GM76 spectrum. However, there are differences in amplitudes and slopes in the low and high wave-number regions between the calculated and theoretical spectra, which are

**基金项目** 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** 董崇志,男,1981年生,博士研究生,主要从事海洋地球物理研究. E-mail: czdong@mail.iggcas.ac.cn

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

considered to be associated with strong interaction between the internal tides and the complex seafloor topography, and internal wave breaking, etc.

**Keywords** Seismic oceanography, Ocean internal wave, Internal wave spectra, GM76 spectrum

## 1 引言

海洋内波是指发生在密度稳定层化的海水内部的一种重力波动,其波长、周期和垂向振幅分布在很宽的范围内,一般分别为近百米至几十千米、几分钟至几十小时、几米到几十米,其垂向振幅远大于海面上的重力表面波.内波在海洋中起着重要的动力学作用,并对海洋生态环境、潜艇航行、石油钻探开发与工程设施等都会产生重要影响<sup>[1]</sup>.因此,探讨内波的产生、分布和衰减,进一步认识其形成机制和能量耗散机制,是20世纪70年代后国内外物理海洋学研究的热点.而内波研究的进展和水平很大程度上取决于所获取观测资料的数量和质量,但无论是传统的接触式温-盐-深测量还是卫星遥感等观测手段,都无法在短时间内对整个海水剖面的温盐结构进行成像,给出内波波动的空间形态<sup>[2]</sup>.

2003年, Holbrook 等<sup>[3]</sup>第一次成功地利用常规反射地震方法,对纽芬兰大滩附近的北大西洋海水温盐细结构进行成像.通过地震叠加剖面与 XBT(投弃式温深计)测量数据对比,指出垂向上地震反射振幅的变化与海水层温度差的变化相对应,进一步揭示了 NAC(北大西洋洋流)和 LC(拉布拉多洋流)交界面处海洋锋的温盐特性.反射地震方法具有很高的水平分辨率,能够弥补传统物理海洋学观测方法的缺陷.利用反射地震研究物理海洋现象,是近年来刚刚出现,还处于萌芽阶段的地震海洋学(Seismic Oceanography)<sup>[3,4]</sup>.2005年, Holbrook 等<sup>[5]</sup>在利用反射地震方法研究挪威海海水温盐结构时,发现反射层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.经过分析认为这种波动反映了海洋内波的形态特征,计算其水平波数能量密度谱(以下简称水平波数谱或内波谱)后,发现与 GM76 模型谱<sup>[1,6~8]</sup>基本一致,从而证明了反射地震方法在海洋内波研究中的可行性.

南海东北部具有复杂的地形和潮流分布,内波非常发育,被国际公认为优良的天然内波试验场<sup>[1,2]</sup>.对南海东北部内波已有较多研究,但定量计算内波波数谱的研究工作极少<sup>[1,2,9~15]</sup>.本文首次利用反射地震方法对我国南海东北部海域的内波谱特

征进行了探索性研究.

## 2 地震数据的采集和处理

2001年8月4~6日,国家973“中国边缘海形成演化及其重大资源的关键问题”项目委托广州海洋地质调查局,利用“探宝号”调查船在南海东北部进行了地震数据采集,其中一段测线的位置如图1所示,总长463 km.用道间距为12.5 m的240道水听器记录地震数据,采样间隔为2 ms,记录长度为10 s.震源采用容量为3000 in<sup>3</sup>(1 in=2.54 cm)套筒枪阵,炮间距为50 m,近炮检距为250 m.

与传统反射地震处理不同,我们这里主要研究的是海水的内部结构,因此在数据处理过程中,保留海底以上的全部反射地震信息.采用常规反射地震处理流程对数据进行分析处理,其中包括:定义观测系统、共中心点(CMP, Common Mid-Point)道集选择、速度分析、动校正和叠加.为了保持反射波振幅的相对大小,我们没有进行滤波、增益及其他修饰性处理.图2是最终的叠加剖面,蓝线代表拾取的反射层位置.剖面显示海水层的反射具有复杂特征:深度从300~975 m的海水,基本上都存在着起伏波动的反射层; CMP10000~14000 和 CMP52000~62000 位置的反射层较剖面其他位置起伏变化剧烈,这些反射特征指示了复杂多变的海水温盐结构<sup>[3]</sup>.由于受观测条件限制,传统测量方法的水平采样间隔往往很大(一般为5~50 km),对于流动性强的海水而言,这种大间隔的测量较难满足对海水精细结构研究的要求.反射地震剖面的道间距一般为6.25 m(CMP间隔),如此高的水平采样率,是传统物理海洋观测水平采样率的几百到几千倍,这为研究海水垂向结构的水平方向上的变化提供了详尽的资料.

## 3 内波谱的计算

### 3.1 通过地震剖面计算内波谱

如图2所示,几乎所有海水中的反射层都存在着振幅为几十米、波长从几十米到几千米的起伏波动.这种起伏变化反映了海洋内波形态<sup>[5]</sup>.主要原因

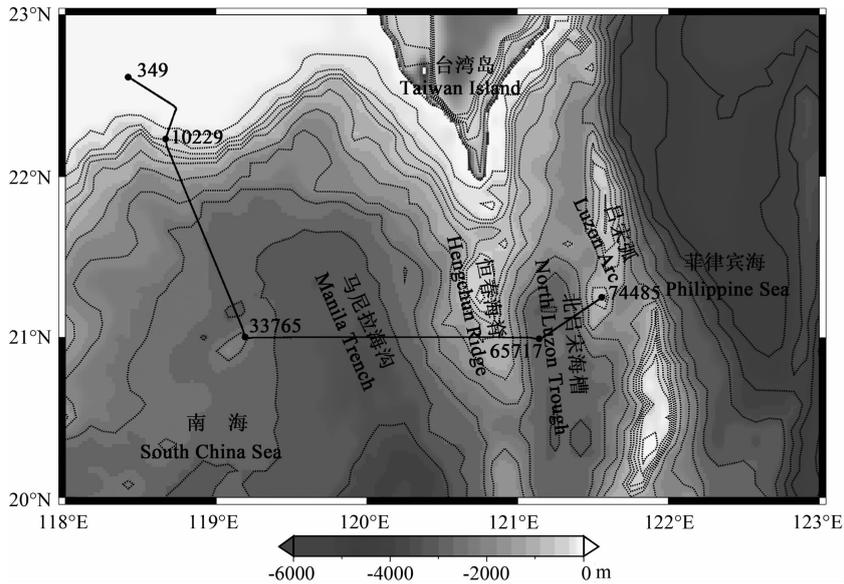


图1 南海东北部位置图

粗黑线代表地震测线的位置,测线上黑点处的数字表示反射地震数据处理的共中心点(CMP)序号。

Fig. 1 Bathymetry of the northeastern South China Sea

Thick black line indicates the position of the MCS profile, and CMP numbers are also shown along the line.

有两点:(1)由于海底或者海底以下的反射层没有呈现出类似的波动,因此可以排除海底多次波、滤波等产生的假象;(2)因为起伏的反射层没有显示与调谐作用有关的波形和频率变化,所以也不可能是由薄层效应所带来的干涉图样<sup>[5]</sup>。因此地震叠加剖面详细反映了海洋内波的空间形态。

对叠加剖面起伏变化的同相轴进行加工处理,可以得到内波的水平波数谱。采用反射地震数据解释的 Strata 软件的同相轴自动追踪模块,以 6.25 m 的水平间隔(CMP 间距)对一系列反射层进行数字化。在用户选定的时间窗(我们选用的是 15 ms)内,从初始解释反射点向左右两边自动追踪波形,选取最近的波峰或波谷。在拾取层位过程中,采取人机结合的方式,针对自动拾取层位的不合理跳跃进行手工校正,使其符合反射层的真实位置。数字化完成后,采用 1500 m/s 的海水声速把反射层从时间域转换到深度域,得到最终的拾取结果(图 2 蓝线所示)。

共选取 9 条不同水平位置的反射层(H1~H9)进行对比分析,反射层的层号、位置(CMP 范围)、长度、平均深度、所处位置的海底平均深度以及内波最大振幅如表 1 所示。9 条反射层基本覆盖了整条测线,其中 H1、H2、H3 位于陆坡区域,H4 位于恒春海脊、H5~H9 位于南海东北部海盆。

反射层的起伏深度减去其拟合直线得到的垂直位移( $\zeta$ ),在此基础上采用功率谱估计的韦尔奇方法(Welch's method)计算内波的水平波数谱(图 3)。

表 1 9 条反射层的基本信息

Table 1 The basic information of nine reflection events

反射层号	CMP 范围	反射层长度(m)	反射层平均深度(m)	海底平均深度(m)	内波最大振幅(m)
H1	11160~12014	5337.5	600.56	667	35.55
H2	12052~13020	6050	556.07	861.69	16.29
H3	13290~15324	12713	672.28	1310.7	29.88
H4	59269~61955	16788	532.19	1024.3	39.99
H5	36254~49017	79769	462.35	3246.3	36.58
H6	48793~51212	15119	533.71	3133.8	24.63
H7	50128~55229	31881	803.42	2624.7	33.37
H8	16430~22191	36006	702.57	2324.3	24.52
H9	22204~27296	31825	688.08	2769.8	19.50

窗口选取 1/8 反射层总长度的半重叠汉宁窗。为了消除海水密度梯度对内波振幅的影响,利用 1991 年 7 月 11 日位于测线附近(20.744°N, 120.712°E)的 CTD(Conductivity-Temperature-Depth, 温度电导率深度仪)资料计算的浮力频率  $n$ (buoyancy frequency):

$$n = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}} \quad (1)$$

的平均值 2.02 cph(cycles per hour)对内波谱进行了标定,其中  $z$  表示深度, $\rho$  表示海水密度, $g$  表示重力加速度。

### 3.2 GM76 内波模型谱的计算

1972 年,Garrett 和 Munk<sup>[16]</sup>首次根据大量观测

资料及随机过程理论成功地提出了大洋内波波数-频率能量密度谱,即 GM72 模型. 虽然它只是对远离岸界和赤道的开阔大洋内波的统计描述,未能揭示其物理机制,但仍是内波资料分析的准绳,是进一步开展理论研究的基础,因而被誉为内波研究的里程碑. 而后,他们根据新的观测资料对 GM72 进行改进,提出了 GM75 和 GM79 模型. 在 GM75 之后,其他学者也提出了一些改进的内波谱模型,如 GM76 模型和 IWEX<sup>[17]</sup> 模型等<sup>[1]</sup>. 本文采用 GM76 模型与地震资料计算的内波谱模型进行对比.

假设大洋内波波场是水平各向同性和垂向对称的(即上传波能通量与下传波能通量统计意义上相等),能量密度谱  $E(\alpha, \omega)$  可表示为

$$E(\alpha, \omega) = E_0 A(\alpha, \omega) B(\omega), \quad (2)$$

其中  $\alpha, \omega$  和  $E_0$  分别为总水平波数、频率和能级常数.

$B(\omega)$  定义了能量谱随频率的变化,形式如下:

$$B(\omega) = \frac{2}{\pi} \frac{\omega_i}{\omega} (\omega^2 - \omega_i^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中,  $\omega_i = 2\Omega \sin\varphi$ , 即惯性频率; 其中  $\Omega$  表示地球旋转角速度,  $\varphi$  表示地球纬度.

$A(\alpha, \omega)$  定义了每个频率处的波数谱形状. 假设  $A(\alpha, \omega)$  是自相似的, 可表示为

$$A(\alpha, \omega) = \frac{A\left(\frac{\alpha}{\alpha_*}\right)}{\alpha_*} = \alpha_*^{-1} \frac{2}{\pi \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\alpha_*}\right)^2\right]}, \quad (4)$$

尺度因子  $\alpha_* = \alpha_*(\omega)$  要求在每个频率处的能量密度谱  $E(\alpha, \omega)$  随波数变化的形态相同.

尺度因子  $\alpha_*$  由简化的频散关系给出:

$$\alpha_* = \frac{5}{Nb\pi} (\omega^2 - \omega_i^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

其中,  $N$  是试验海区浮力频率剖面 (buoyancy frequency profiles)  $N(z)$  在海洋上混合(均匀)层下界的量值, 本文取  $N = 3.00$  cph;  $b$  表示海水层化深度, 本文取 1.30 km.

由式(2)和式(3)~(5)表示的内波谱, 一般称为 GM76 内波模型谱. 而为了将基于反射地震剖面深度起伏计算得到的实测内波谱与 GM76 模型谱进行比较, 我们还需要将式(2)~(5)定义的模型谱  $E(\alpha, \omega)$  投影到单一水平波数方向上, 并在内波定义的频率区间  $[\omega_i, n]$  上进行积分, 从而导出相应的 GM76“拖曳谱”(tow spectrum)<sup>[6]</sup>, 即

$$F_\zeta(\alpha_1) = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_i}^n \int_{\alpha_1}^\infty (\alpha^2 - \alpha_1^2)^{-1/2} E(\alpha, \omega) \overline{Z^2} d\alpha d\omega, \quad (6)$$

式中,  $\alpha_1$  为水平波数的单一分量; 浮力频率  $n$  取反

射地震剖面试验海区的平均值 2.02 cph; 惯性频率  $\omega_i$  按试验海区的纬度 (21°) 取值为 0.19 cph.

$\overline{Z^2}$  是内波垂直位移场的波函数, 即

$$\overline{Z^2} = \frac{b^2 N}{n} \frac{(\omega^2 - \omega_i^2)}{\omega^2}. \quad (7)$$

为计算简便, 用(8)式进行变量替换

$$\begin{cases} \sec\theta = \omega/\omega_i, \\ (z^2 + 1)^{1/2} = \alpha/\alpha_1, \\ \mu = \pi Nb/(5n), \\ \nu = n\alpha_1/\omega_i, \\ \varepsilon = \omega_i/n, \\ r = E_0 b^2 N = 430 \text{ m}^2 \text{ cph}. \end{cases} \quad (8)$$

由式(2~8)可得拖曳谱的形式如下:

$$F_\zeta(\alpha_1) = \left[ \left( \frac{2}{\pi} \right)^3 \frac{r\mu}{\omega_i} \right] \int_0^{\arccos\varepsilon} \sin\theta \cos\theta \int_0^\infty (z^2 + 1)^{-1/2} \times \left\{ 1 + [\mu\nu(z^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \cot\theta]^2 \right\}^{-1} dz d\theta. \quad (9)$$

我们利用(9)式计算 GM76 模型谱, 结果如图 3 黑实线所示. 观测波数谱与 GM76 等内波模型谱进行对比, 是研究海洋内波的一种常用方法, 能够揭示海洋内波的区域特征.

## 4 结果与讨论

与 GM76 模型谱相比, 9 条反射层的水平波数谱斜率的绝对值随着水平波数从低到高, 呈现先偏大再偏小的现象(图 3), 这反映了南海东北部内波的区域特征. GM76 模型谱反映的对象主要是大洋的高频随机内波, 但是引起地震剖面同相轴起伏变化的因素除了高频随机内波, 还包括低频内潮波、内孤立波、海洋细结构、内波破碎引起的湍流、高频噪声等. 而南海东北部的复杂地形和潮流分布, 决定了测线所处位置的低频内潮波和内孤立波非常发育<sup>[9~15]</sup>. 并且这种低频内波一般其传播速度较高频随机内波快, 从而其水平波数较小, 因此南海发育的低频内潮波和内孤立波导致内波谱振幅在低波数段偏大. 在高波数段, 地震剖面计算的内波谱还受到内波破碎引起的湍流、高频噪声、同相轴拾取误差等影响, 致使在波数大于  $10^{-2} \text{ c} \cdot \text{m}^{-1}$  段, 计算谱的振幅也偏大. 因此与 GM76 模型谱相比, 计算的内波谱斜率绝对值呈现低波数段偏大、高波数段偏小的现象.

与其他反射层相比, H1~H4 的波数谱振幅在低波数段较大, 这可能与反射层所处位置的海底较浅以及地形起伏变化剧烈(H1~H3 位于陆坡、H4

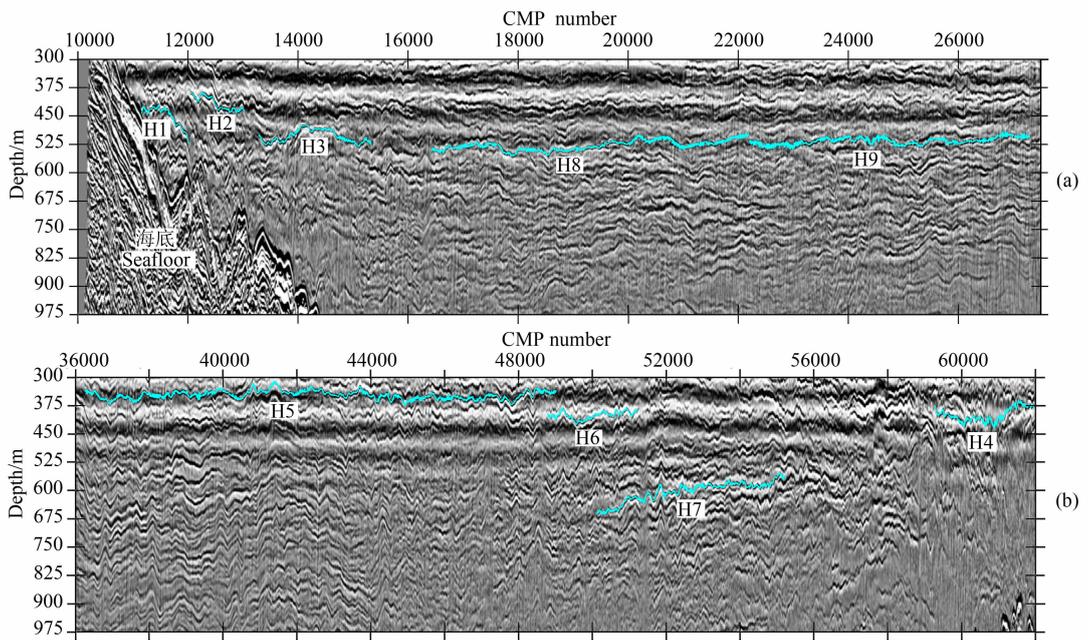
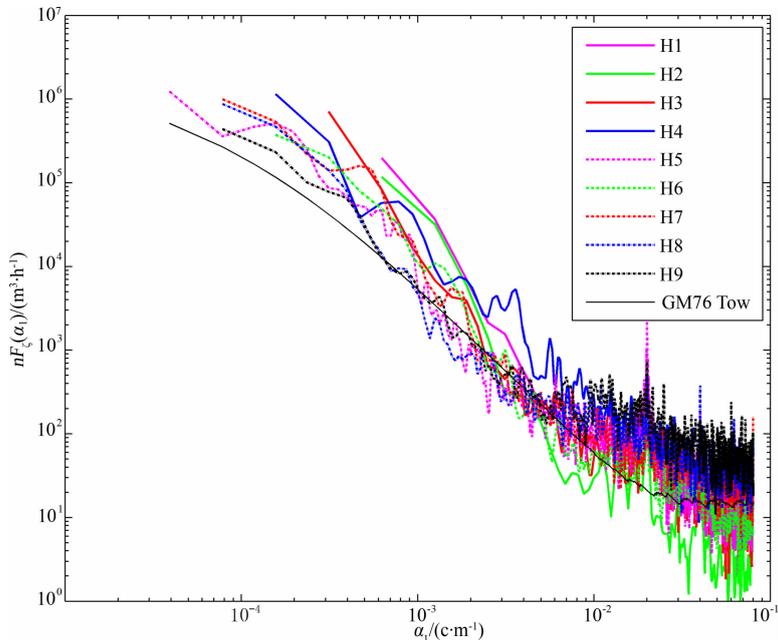


图 2 地震叠加剖面

9 条蓝线 (H1~H9) 代表用于计算水平波数谱的反射层。

Fig. 2 Seismic section showing the undulation of reflection events

Nine blue lines are tracked curves for calculating the horizontal wave number spectra.

图 3 内波垂直位移的水平波数谱, 其中  $n$  代表用于标定的浮频率平均值Fig. 3 Horizontal wave number spectra of vertical displacement of internal wave, all scaled by the average buoyancy frequency  $n$ 

位于恒春海脊)有关。剧烈起伏变化的海底边界与潮流较强的非线性作用, 可能导致低频内波较测线其他位置发育, 致使这些区域的内波谱在低波数段能量较大。

上述研究表明, 反射地震方法较传统海洋观测手段, 具有明显的优势, 主要体现在高的水平分辨率

(CMP 间隔 6.25 m) 和短时间内对整个海水剖面进行成像<sup>[3]</sup>。从叠加剖面(或偏移剖面)上, 能够清楚地观测到内波造成的反射层的起伏变化, 因此反射地震为我们进一步研究内波的产生、分布和耗散机制提供了新的途径。

反射地震方法不仅可以探测海洋内波<sup>[5]</sup>, 还能

够刻画水团边界<sup>[18]</sup>、中尺度涡旋<sup>[19,20]</sup>、海洋锋<sup>[3,21]</sup>以及温盐细结构等物理海洋学现象. 较详细地展示中尺度过程与海水细结构之间的关系, 从而可望有助于改进我们对能量大中小尺度传递过程的认识. 这也预示着, 反射地震方法将成为被大家广泛接受的物理海洋学工具<sup>[22]</sup>.

**致 谢** 感谢葡萄牙 Aveiro 大学的 Pinheiro 教授、Dubert 教授、加拿大 Dalhousie 大学 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、感谢中国科学院南海海洋研究所甘子钧研究员、王东晓研究员、齐义泉研究员、周伟东研究员、詹海刚研究员、北京大学杨海军副教授等在物理海洋学方面的指点.

## 参考文献 (References)

- [1] 方欣华, 杜 涛. 海洋内波基础和中国海内波. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005  
Fang X H, Du T. Fundamental of Oceanic Internal Waves and Internal Waves in the China Seas (in Chinese). Qindao: China Ocean University Press, 2005
- [2] 杜 涛, 吴 巍, 方欣华. 海洋内波的产生与分布. 海洋科学, 2001, **25**(4): 25~28  
Du T, Wu W, Fang X H. The generation and distribution of ocean internal waves. *Marine Sciences* (in Chinese), 2001, **25**(4): 25~28
- [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] 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] Holbrook W S, Fer I. Ocean internal wave spectra inferred from seismic reflection transects. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L15604, doi: 10. 1029/2005GL023733
- [6] Katz E, Briscoe M G. Vertical coherence of the internal wave field from towed sensors. *J. Phys. Oceanogr.*, 1979, **9**(3): 518~530
- [7] Garrett C, Munk W. Space-time scales of internal waves: progress report. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**(3): 291~297
- [8] Cairns J L, Williams G O. Internal wave observations from a mid-water float, 2. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**(C4): 1943~1945
- [9] Liu A K, Chang Y S, Hsu M K, et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(C4): 7997~8008
- [10] 张效谦, 梁鑫峰, 田纪伟. 南海北部 450 m 以浅水层内潮和近惯性运动研究. 科学通报, 2005, **50**(18): 2077~2031  
Zhang X Q, Liang X F, Tian J W. Observation of internal tides and near-inertial motions in the upper 450 m layer of the northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(24): 2890~2895
- [11] 蔡树群, 甘子钧. 南海北部孤立子内波的研究进展. 地球科学进展, 2001, **16**(2): 72~76  
Cai S Q, Gan Z J. Progress in the study of the internal soliton in the northern South China Sea. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2001, **16**(2): 72~76
- [12] 蔡树群, 甘子钧, 龙小敏. 南海北部孤立子内波的一些特征和演变. 科学通报, 2001, **46**(15): 1245~1250  
Cai S Q, Gan Z J, Long X M. Some characteristics and evolution of the internal soliton in the northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(1): 21~27
- [13] Zhao Z, Klemas V, Zheng Q, et al. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L06302, doi: 10. 1029/2003GL019077
- [14] 方文东, 施 平, 龙小敏等. 南海北部孤立内波的现场观测. 科学通报, 2005, **50**(13): 1400~1404  
Fang W D, Shi P, Long X M, et al. Internal solitons in the northern South China Sea from in-situ observations. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(15): 1627~1631
- [15] 郭 朴, 方文东, 甘子钧等. 南海北部大陆坡区的内潮特征. 科学通报, 2006, **51**(增刊 II): 15~22  
Guo P, Fang W D, Gan Z J, et al. The characteristic of internal tides in the slope in northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2006, **51**(Suppl. II): 15~22
- [16] Garrett C, Munk W. Space-time scales of internal waves. *Geophys. Fluid Dyn.*, 1972, **3**: 225~264
- [17] Muller P, Olbers D J. The IWEX spectrum. *J. Geophys. Res.*, 1978, **81**(C1): 479~500
- [18] 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**, L23321, doi: 10. 1029/2004GL021325
- [19] Biescas B, Sallarès, Pelegrí J L, et al. Imaging meddy fine structure using multichannel seismic reflection data. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**: L11609, doi: 10. 1029/2008GL033971
- [20] 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. *J. Mar. Syst.*, 2009, doi: 10. 1016/j. jmarsys. 2009. 07. 004
- [21] 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.*, 2006, **33**: L23605, doi: 10. 1029/2006GL027437
- [22] 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