

# 南海北部中尺度涡与内波相遇的特征分析

司广成, 于非, 刁新源

(中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 基于 2009 年 12 月~2010 年 4 月南海北部大陆坡上东沙岛以西的一套潜标资料, 分析一个中尺度涡与内波相遇时海水温度的变化特征。根据潜标上的温压记录, 利用功率谱分析, 发现潜标布放处存在周期为 20~30 min 的内孤立波及全日和半日周期的内潮; 结合海表面高度异常资料, 描述此处一个中尺度涡的经过过程。利用天文大潮发生的时间规律, 推断出中尺度涡与内波的相遇, 从而解释了压力记录的异常变化。根据中尺度涡与内波各自引起的海流流向, 分析在本次观测中两者相遇时的共同作用所引起的海水温度的垂向变化, 即当两者引起的流向相反时, 内波引起的日周期等温线波动由上凸型弧状变为下凹型弧状, 短时震荡由向下振荡变化为向上振荡。

**关键词:** 南海北部; 内潮; 内孤立波; 中尺度涡

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)06-0089-06  
doi: 10.11759/hyqx20121225001

南海北部陆架坡区是海洋动力过程活跃的海区。这里地形变化剧烈, 海洋现象复杂, 多种时空尺度的现象同时存在。在东沙岛西侧海区, 除受季风影响的季节性海流之外, 比较常见的就是内波和中尺度涡这两种海洋现象。

海洋内波包括具有潮周期的内潮波和周期几十分钟的内孤立波。在这片海区, 在天文潮的作用下, 密度层结的海水遇到剧烈变化的地形, 激发而生成内潮。在特定条件下, 内潮与地形发生非线性相互作用, 生成振幅巨大的内孤立波。20 世纪 90 年代, 已有学者对此处的内波进行了观测和研究。邱章等<sup>[1]</sup>观测到了该海区存在的周期约 24 h 内潮现象, 并研究了此海区内潮的垂向结构<sup>[2]</sup>。张爱军等<sup>[3]</sup>用谱分析方法分析了一定点站的温度和海流的全日潮和半日潮特征。2000 年以后, 随着观测技术的提高, 特别是潜标和温度链的布放, 内波的研究越来越多。方文东等<sup>[4]</sup>观测到此海区内孤立波造成的突发性强流。在亚洲海国际声学实验中, 各国学者采用多套潜标系统对内孤立波进行了系统的观测(Duda 等<sup>[5]</sup>)。后来, 李德俊等<sup>[6]</sup>利用 4 套锚系资料发现内潮水平传播方向基本与等深线相互垂直。在前人的观测与理论的基础上, 杜涛等<sup>[7]</sup>总结了该海区内波的生成和分布特征, 蔡树群等<sup>[8]</sup>对近 10 a 来的内孤立波的生成机制和传播规律进行了综述。

另外, 此处也是中尺度涡多发的海区。一般来说, 依据来源可将中尺度涡分为 2 种: 一种源于黑潮,

沿陆架坡西向移动到本海区; 另一种在南海内生成。南海北部的中尺度涡是一种季节内周期的现象, 一般持续 1~2 个月, 自东向西移动, 空间尺度一般几十公里至上百公里。李立等<sup>[9]</sup>在南海北部大陆坡外首次捕捉到一个反气旋型的黑潮分离流环。李燕初等<sup>[10]</sup>分析 T/P 高度计资料, 结果表明此海区为中尺度涡的高能量区, 尤其经常产生反气旋涡。Wang 等<sup>[11]</sup>研究了中尺度涡对温度剖面的影响。林鹏飞等<sup>[12]</sup>采用 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellites Oceanographic)资料指出南海北部 118°E 以西的中尺度涡主要沿 200 m 等深线向西南移动。

本文所用到的观测同时捕捉到了中尺度涡和内波, 研究了南海北部陆架坡上中尺度涡与内波相遇时的共同作用引起的压力和温度的变化, 对南海北部涉及中尺度涡和内波观测的资料分析有一定的借鉴作用, 对该海区这两种重要物理现象的研究有一定的帮助。

## 1 观测资料及其他资料

### 1.1 潜标系统布放与回收

2009 年 12 月 10 日, 一套潜标系统被布放于南海北

收稿日期: 2012-12-25; 修回日期: 2013-05-02

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(200905024-5)

作者简介: 司广成(1981-), 男, 山东青岛人, 工程师, 博士, 主要从事海洋动力学研究, 电话: 0532-82898537, E-mail: siguangcheng@qdio.ac.cn; 于非, 通信作者, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

部东沙岛西侧陆架坡上, 位置为 (115°30'25.14"E, 19°43'24.96"N), 经过从冬季到初春共 114 d 的观测, 于 2010 年 4 月 2 日成功回收。潜标系统上预设计的温度计和压力计标称深度如表 1 所示, 其中 T 表示温度计, D 表示压力计。

表 1 潜标系统温度计和压力计设计深度  
Tab. 1 Designed depth of thermometer and manometer

设计深度 (m)	50	75	100	125	150	200	250	500	742
记录情况	T&D	T	T	T	T	T	T	D	T

潜标系统上的温度计和 50 m 处压力计每 2 min 记录一次, 500 m 处压力传感器每 30 s 记录一次。潜标设计布放于 1 500 m 处, 由于陆架坡较陡, 地形变化较大, 最终布放于约 1 800 m 处, 如图 1 中的黑色三角所示。

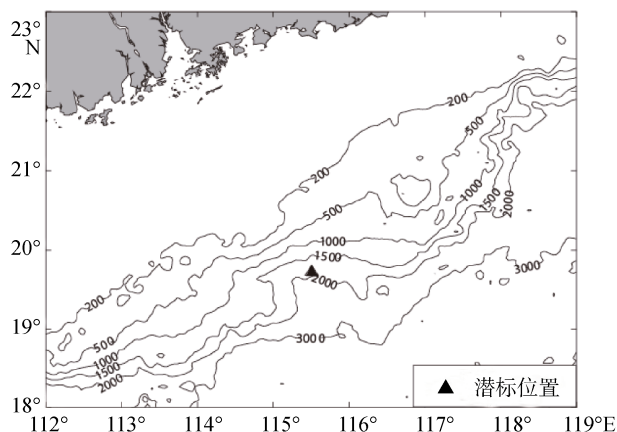


图 1 潜标布放位置及周边地形(m)

Fig. 1 The location of mooring system and surrounding topography (m)

### 1.2 潜标系统资料处理

首先对各温度计及压力计中个别不正常的数据进行剔除, 其次将 500 m 层上压力记录时间的分辨率插值到 2 min, 根据两组压力记录以及各温度计的标称深度对各温度计进行深度订正, 尽量消除大流速作用下的潜标系统倾斜对观测造成的影响, 最后, 在每个时刻, 根据订正之后的压力对温度进行垂向插值至 5 m/层。

### 1.3 其他资料

本文还使用了法国航空局提供的 AVISO 中的全球海面高度异常 (Maps of Sea Level Anomalies, MSLA) 数据, 空间分辨率 (1/4)° × (1/4)°。另外还有俄

勒冈州立大学 (Oregon State University, OSU) 提供的 TPXO7.2 全球 1/4° 调和常数数据集。

## 2 结果与分析

### 2.1 压力记录的多时间尺度起伏

设计尝试 50 m 处的压力计的压力在整个观测期间起伏较大 (图 2), 变化非常复杂。在 1 月初和 2 月初的 5~6 d 均呈现较强的振荡, 各形成一道比较整齐的波列, 振幅分别可达 70 m 和 40 m。2 月中旬~4 月初呈现一个总体先缓慢下降又缓慢上升的 40 多天的较缓的起伏, 在此背景缓变压力值之上, 在 3 月初的几天内, 压力值呈现出明显的回升, 相对于背景缓变压力值回升可达 50 m。设计 500 m 处的压力记录与 50 m 处相比, 变化幅度较小, 但总体变化情况类似。

两压力记录显示, 此处既存在短时的变化, 又存在日周期的变化, 还存在月以上的变化, 呈现一个多时间尺度交错的过程。

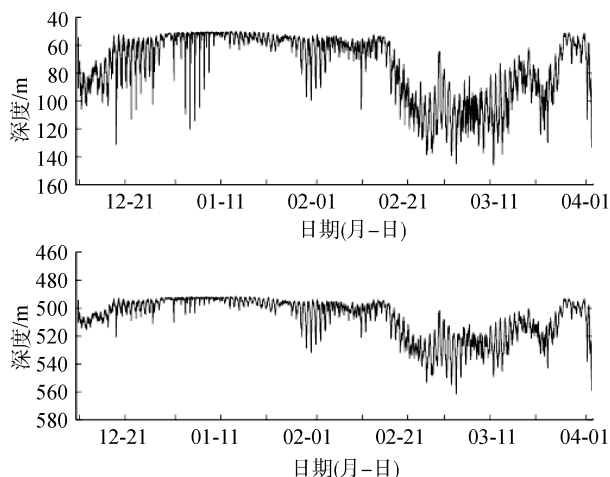


图 2 50 和 500 m 处的压力计所在深度

Fig. 2 Depth of sensors designed at 50m and 500m underwater

### 2.2 内潮波和内孤立波

1 月 1~10 日, 在日周期上, 压力在 50~70 m 呈现规律的波动 (图 3), 振幅约 20 m。对此段时间压力进行逐小时平均, 消去峰值后, 进行谱分析 (图 4), 可以看出, 其中两个显著谱峰 (位于谱峰检验曲线之上) 都接近于潮周期, 表明此波动为内潮引起, 并且此处的内潮以全日潮 (周期  $P_1$  约为 24 h) 为主, 半日潮 (周期  $P_2$  约为 12 h) 为辅。在温度剖面时间序列图 (图 5) 上, 可以更清楚地看到此处内潮引起的等温线呈现上凸型弧状, 呈日周期波动。

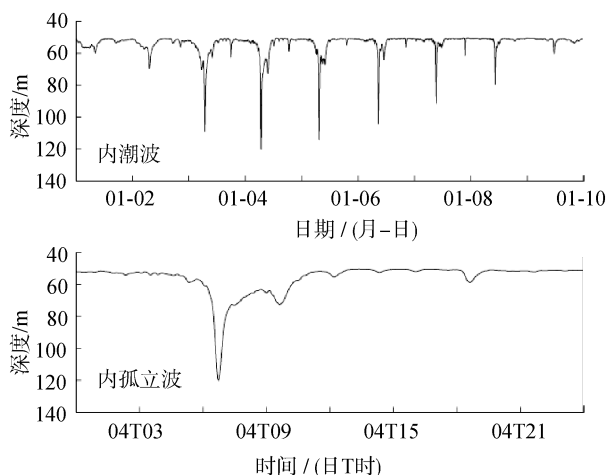


图3 1月初压力记录显示的内潮波和内孤立波

Fig. 3 Internal tides and internal solitary waves from pressure records

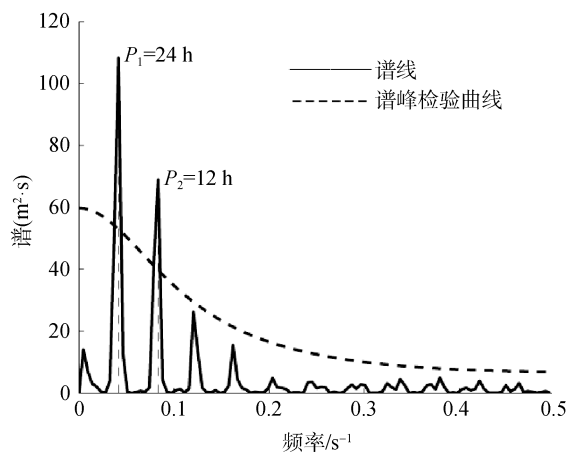


图4 1月1~10日压力记录谱分析

Fig. 4 Power spectrum analysis of pressure from Jan 1 to Jan 10

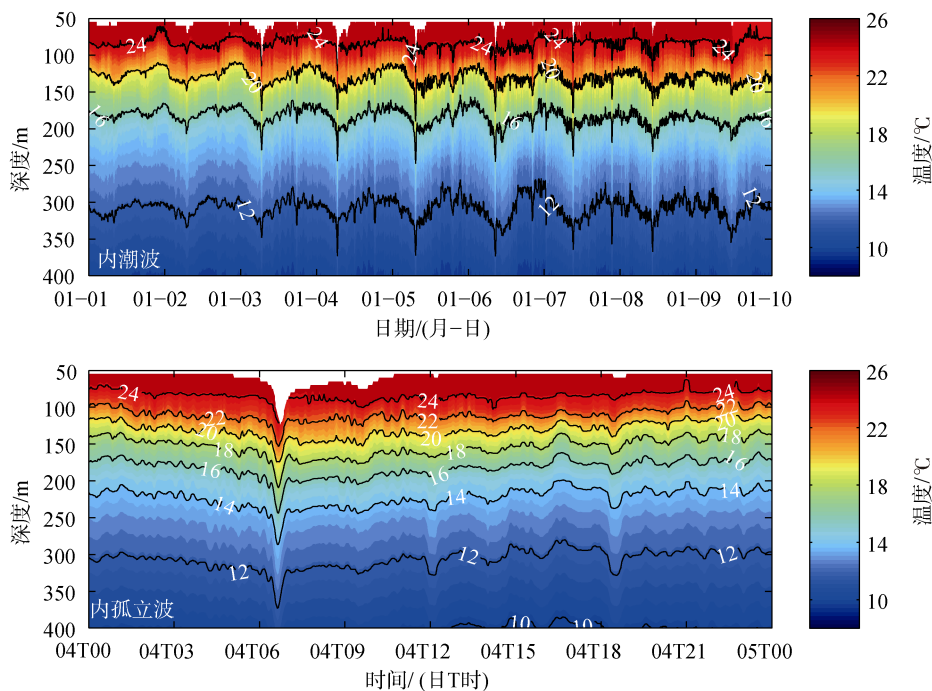


图5 1月初温度记录显示的内潮波和内孤立波

Fig. 5 Internal tides and internal solitary waves from temperature records

在内潮波动之上, 1月3~9日, 压力每日都发生一次20~30 min的快速振荡, 结合温度可以看出, 这是由该处的内孤立波导致。这几个内孤立波每日固定于6:00~7:00发生, 周期20~30 min, 出现于每日内潮波动的最下凹陷时刻, 向下震荡。1月4日的内孤立波振幅最大, 可达70 m。在此之后, 10:00、12:00和14:00, 可以明显看到此内孤立波的尾迹波动。

### 2.3 中尺度涡的经过过程

前述中图2显示压力记录2月中旬~4月初呈现

一个总体先缓慢下降又缓慢上升的40多天的较缓的起伏过程。同时, 温跃层也逐渐由约120 m下降到约180 m, 下降了约60 m(图6)。

AVISO的海面高度异常图(图7)展示了一个尺度超过 $1^\circ \times 1^\circ$ 的反气旋式的强中尺度涡从接近潜标到远离潜标的过程。中尺度涡从2月中旬开始由潜标东侧逐渐向潜标移动, 此时潜标系统受中尺度涡引起的强大的北向流的影响而发生倾斜, 深度下降。至3月3日, 中尺度涡到达潜标南侧距离最近处, 潜标

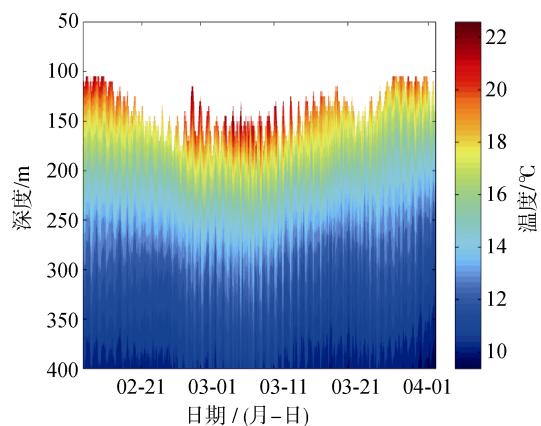


图 6 中尺度涡经过时的温度

Fig. 6 Temperature changes caused by mesoscale eddy

下降到最深处, 此时潜标处的流向受相对位置影响变化至偏东方向。之后至 3 月底中尺度涡由西侧逐渐远离, 潜标恢复到正常位置。

## 2.4 内波与中尺度涡相遇

根据中国海调和常数数据集中 13 个调和常数, 可以推算出从潜标布放至回收这段时间的潮流流速(图 8)。从图 8 可以看出, 此处的天文潮以东西分量( $U$ )为主, 每月两次大潮, 上半月的较大, 下半月的较小。1 月初和 2 月初有较大的天文大潮发生, 与图 2 中在 1 月初和 2 月初的 5~6 d 较强的震荡恰好对应。这是由于内潮和内孤立波都是从天文潮中获得能量。

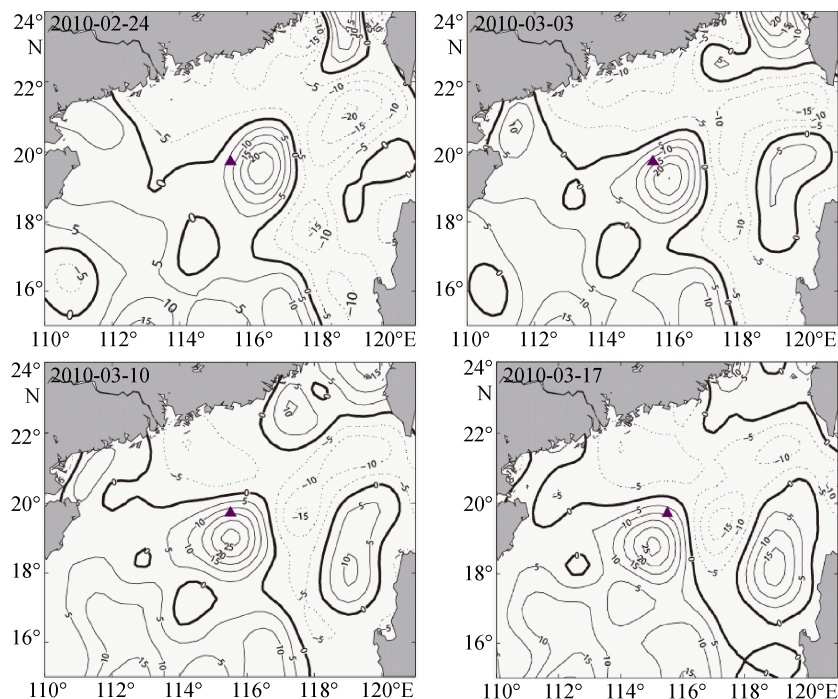


图 7 中尺度涡经过潜标时的海表面高度异常(cm)

Fig. 7 Sea surface height anomaly when a mesoscale eddy passing through the latent mark(cm)

: 潜标位置

: The location of mooring system

3 月初的几天, 也是天文潮大潮的发生时间。与 1 月和 2 月比, 发生的日期基本相同, 只是振幅略呈现逐渐递减的趋势。所以在这几天之内, 应该也会像 1 月一样, 发生比较强的内潮现象, 也可能伴随内孤立波生成, 但与 1 月和 2 月相比, 振幅会相对小。而这几天也正是图 2 中压力值呈现出明显回升的日期。

已有的研究表明, 在南海北部, 内潮和内孤立波生成后, 受陆架坡地形影响, 会向岸传播, 即向偏西方向传播<sup>[6]</sup>, 同时生成偏西方向的流动, 内孤立波

更是能生成流速达 1m/s 量级的瞬时强流<sup>[4]</sup>。而此时过境的中尺度涡引起的流速恰好呈偏东方向, 如图 7 中 2010 年 3 月 3 日的观测所示。于是, 两者相抵消, 使潜标由倾斜的状态回正, 压力值呈现明显的回升。回升最多的一天是 2 月 28 日, 幅度可达 50 多米(图 9)。

两者相遇时(图 10), 叠加于中尺度涡强流影响之上的内潮引起的等温线起伏依然清晰, 波动由图 5 中的上凸型弧状变化为下凹型弧状, 并且在 2 月 28 日和 3 月 1 日内潮较大的日子, 依然能观测到较弱的

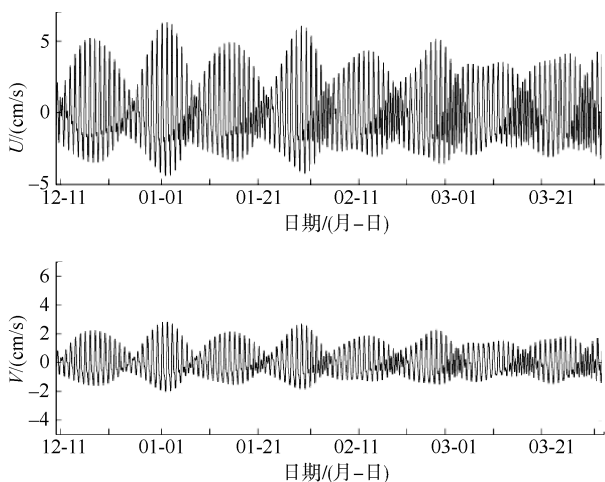


图 8 潜标处潮流东西分量( $U$ )和南北分量( $V$ )

Fig. 8  $U$ -component and  $V$ -component of astronomical tides at the mooring location

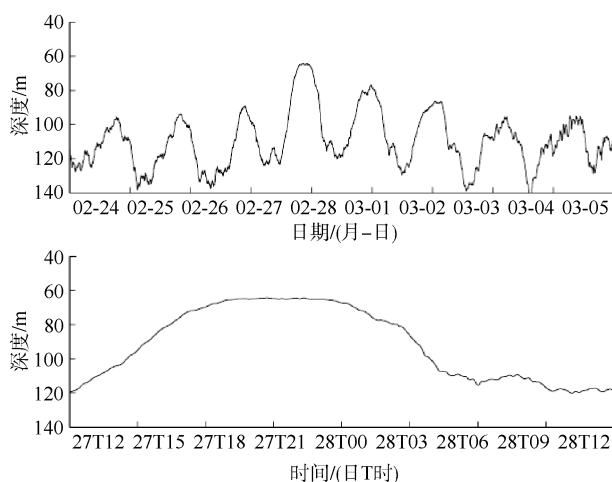


图 9 中尺度涡与内波相遇时的深度变化

Fig. 9 Depth changes during encounter of mesoscale eddy and internal waves

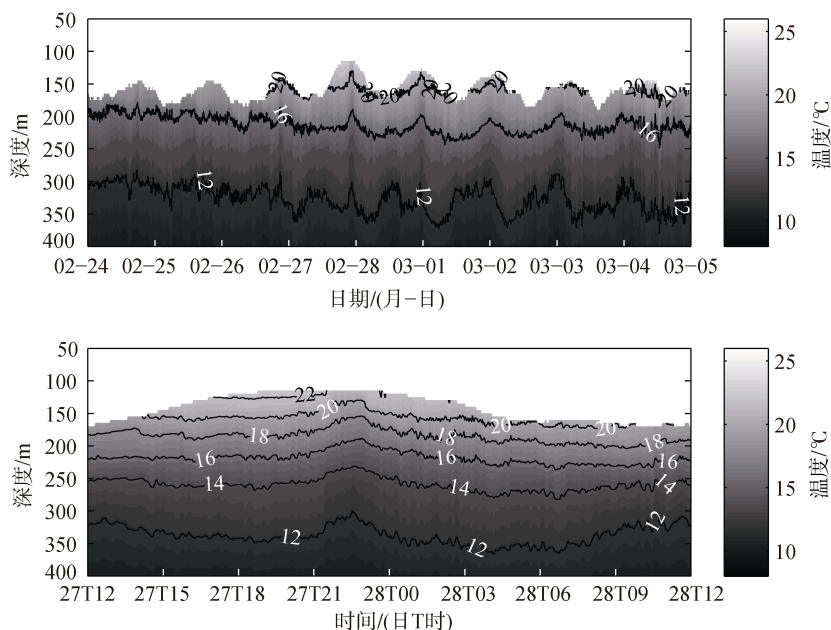


图 10 中尺度涡与内波相遇时的温度变化

Fig. 10 Temperature changes during encounter of mesoscale eddy and internal waves

内孤立波, 温度等值线由向下振荡转变为向上振荡, 但幅度较小, 这是由于内孤立波自身引起的向下的垂向流会对回复有一定的抵消作用。由此可见, 存在中尺度涡的强流作用时与无强流时, 温度等值线波动呈现一个上下反对称的结构。由此, 也可以推断, 如果经过此处的中尺度涡引起的是西向流, 其作用将与内波作用相叠加, 将会加强等温线向下波动。

### 3 结论

1) 在此次南海北部东沙岛西侧陆架坡上的观测

中, 内潮在每月天文大潮期振幅最大, 内孤立波只在内潮较大时生成, 在出现的几天呈现规则波列的形式。

2) 南海北部中尺度涡在月的时间尺度上造成压力曲线和等温线的缓慢波动。

3) 当中尺度涡与内潮波或内孤立波相遇时, 会在季节内变化的背景下引起数天的短时波动, 根据两者引起的流速的方向, 内波对于温度的垂向变化, 起到减弱或加强的作用。

本文同时观测到了中尺度涡和内波, 并展现和

讨论了中尺度涡与内波相遇时的线性共同作用情况对温度垂向变化的影响。而对于两者相遇时引起的非线性变化,尚需更多的资料支持来进行讨论。

参考文献:

- [1] 邱章, 徐锡祯, 龙小敏. 南海北部一观测点内潮特征的初步分析[J]. 热带海洋, 1996, 15(4): 63-67.
- [2] 邱章, 方文东. 南海北部大陆坡区斜压海流的垂向结构[J]. 台湾海峡, 2000, 19(4): 405-412.
- [3] 张爱军, 江明顺. 东海群岛西南海域单站潮流及温盐特征分析[J]. 热带海洋, 1999, 18(1): 23-30.
- [4] 方文东, 陈荣裕, 毛庆文. 南海北部大陆坡区的突发性强流[J]. 热带海洋, 2000, 19(1): 70-75.
- [5] Duda T F, Lynch J F, Irish J D, et al. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1105-1130.
- [6] 李俊德, 梁楚进, 金魏芳, 等. 南海东沙岛西南大陆坡内潮特征[J]. 海洋学研究, 2011, 29(1): 1-8.
- [7] 杜涛, 吴巍, 方欣华. 海洋内波的产生与分布[J]. 海洋科学, 2001, 25(4): 25-28.
- [8] 蔡树群, 何建玲, 谢皆烁, 等. 近 10 年来南海孤立内波的研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 703-710.
- [9] 李立, 苏纪兰, 许建平. 南海的黑潮分离流环[J]. 热带海洋, 1997, 16(2): 42-57.
- [10] 李燕初, 蔡文理, 李立, 等. 南海东北部海域中尺度涡的季节和年际变化[J]. 热带海洋学报, 2003, 22 (3): 61-70.
- [11] Wang Guihua, Su Jilan, Li Rongfeng. Mesoscale eddies in the South China Sea and their impact on temperature profiles[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 24(1): 9-45.
- [12] 林鹏飞, 王凡, 陈永利, 等. 南海中尺度涡的时空变化规律. 统计特征分析[J]. 海洋学报, 2007, 29(3): 14-22.

## Characteristics of encounter between a mesoscale eddy and internal waves in the northern South China Sea

SI Guang-cheng, YU Fei, DIAO Xin-yuan

(Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Dec., 25, 2012

Key words: the northern South China Sea; internal tides; internal solitary wave; mesoscale eddy

**Abstract:** Based on the mooring system on the continental shelf break in the west of the Dongsha Island in the northern South China Sea, the characteristics of encounter between a mesoscale eddy(ME) and internal waves(IW) was analyzed. The internal solitary wave with a period of 20—30s and the internal tides with diurnal and semidiurnal period were found. The passing of a mesoscale eddy was depicted from sea level anomaly. The encounter of mesoscale eddy and internal wave was deduced from the time of sprint tide and thereby the abnormal change of pressure was explained. From the directions of currents caused separately by the ME and IW, we can draw a conclusion that when these two directions are opposite, the downward shake of contour of temperature will change to upward shake.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)