

# 台湾东北部黑潮在流函数空间的水文分析\*

应瑞功<sup>1,2</sup> 闫晓梅<sup>1,2</sup> 孙 澈<sup>1</sup>

(1. 海洋环流与波动重点实验室 中国科学院海洋研究所 青岛 266071;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

**提要** 利用一种流函数投影方法对台湾东北部黑潮近 20 年的历史水文数据进行了诊断分析。结果表明, 苏澳海脊北部位于冲绳海槽西南角的黑潮中层水的盐度明显高于周围海区; 而位于 1000 m 以下的冲绳海槽黑潮深层水相对于苏澳海脊以南的黑潮深层水具有高温低盐的特征, 反映了苏澳海脊对黑潮水团的阻挡作用; 位于 300 m 以浅的冲绳海槽黑潮热带水相对于苏澳海脊以南的黑潮热带水具有低温低盐的特征。对冲绳海槽西南角黑潮中层水高盐中心的成因分析表明, 除苏澳海脊的阻挡作用外, 台湾东北部常年存在的气旋式冷涡与黑潮主体在陆架坡折交汇区的垂直混合过程也是需要考虑的物理因素。

**关键词** 黑潮, 冷涡, 地转经验模态, 黑潮中层水

**中图分类号** P731.1

黑潮是很强的西边界流, 源于北赤道流的北向分支, 通过苏澳海脊进入东海, 沿东海大陆架外缘向东北方向流动, 并通过吐噶喇海峡返回太平洋 (Nitani, 1972); 台湾东北海域由于是黑潮和东中国海陆架水交换的主要场所而成为众多学者关注的焦点, 管秉贤 (1978) 指出台湾及其附近海底地形影响了黑潮路径; 基于 GEK 数据, 孙湘平 (1987) 指出黑潮主轴在此海区夏季远离陆架而冬季靠近陆架。Lin 等 (1992) 利用卫星 IR 数据, 发现黑潮锋夏季远离陆架而冬季靠近陆架; Chen 等 (1995) 研究了台湾北部海域水团混合的若干现象, 指出由于地形的阻挡, 黑潮次表层水涌升在陆架边缘形成冷涡; 根据水文调查, Hsueh 等 (1992) 指出在冬、春季节黑潮在台湾东北陆架坡处直接入侵陆架, 同时 Hsueh 等 (1993) 还利用两层约化重力模型验证了陆架对黑潮的阻挡效应; Tang 等 (1999, 2000) 对台湾东北部海流的结构作了大量深入的研究, 指出此海区的海流结构主要受黑潮主轴的季节性移动影响, 同时指出黑潮入侵形成的涌升流存在季节性变化; 其他学者 (苏纪兰等, 1989;

袁耀初等, 2000; 郭炳火等, 2000; 修树孟等, 2006) 对此区域黑潮的流量、流型、涡旋等海流水文状况也做了大量的工作。在分析水文资料的同时, 很多学者利用数值模式研究黑潮的入侵机制和分支现象 (Chao 1990; Qiu *et al.*, 1990; Liu *et al.*, 1992; Chern *et al.*, 1994; Guo *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007; 刘在科等, 2008)。

基于美国海洋资料中心的历史水文数据, 应用 Sun 等 (2001, 2002) 发展的一种斜压流函数投影方法——地转经验模态 (Geostrophic Empirical Mode, GEM), 通过将水文数据投影到斜压流函数空间来获取整个海流垂直方向的水文结构, 能够减少中尺度涡旋和海流非线性所引起的水文噪音, 从而能够将所有的历史数据作为一个整体进行诊断分析。通过构建台湾东北部黑潮年平均及季节平均的温、盐 GEM 场, 分析其在流函数空间上的季节变化, 并对其中的现象作出讨论。

## 1 数据处理和 GEM 方法

采用的数据来源于美国海洋资料中心 (NOEC) 发

\* 国家重点基础研究计划项目, 2007CB411800 号及国家自然科学基金项目, 40776014 号。应瑞功, E-mail: yingruigong@qdio.ac.cn

通讯作者: 孙 澈, E-mail: csun@qdio.ac.cn

收稿日期: 2009-04-04, 收修改稿日期: 2010-03-06

布的 WOD05(World Ocean Database 2005), 这些资料中包含 WOCE 断面观测资料; 考虑到标准层数据垂直分层相对比较稀疏且标准层的数据是经过插值得到, 而观测层数据比较密集, 温、盐廓线比较完整, 因而采用观测层数据, 选用空间区域是 121°—124.5°E、23°—26.5°N。由于此海区 1985 年之前资料较少且存在质量问题, 因此选用的时间长度为 1985—2005 年; 进一步对数据进行了质量控制, 首先去掉测量中的明显坏点和不符合此区域水文特性统计结构的点, 接下来利用温-深、盐-深、温-盐曲线进行质量控制, 对经过质量控制后的数据进行研究。共计 6210 个站点, 图 1(右上)中实点为所采用的数据站点的分布, 图 1(右下)为数据的年分布和月分布。

采用 100 m 相对于 700 m 的位势高度作为斜压流函数参数(Sun *et al.*, 2002)对于每个站点, 此流函数参数表示如下:

$$\phi_{100-700} = \int_{100}^{700} \delta dp$$

其中  $\delta$  为比容异常,  $p$  为压力。选取 100 m 作为斜压流函数的积分上限, 是为了去除黑潮表面混合层存在的季节性温、盐变化和风应力引起的非地转效

应, 而选取 700 m 作为计算流函数参数的积分下限是考虑到黑潮强流基本在 700 m 以上的深度, 如果积分下限太浅, 就不能充分反映黑潮的斜压结构。另外, 为了包括尽可能多的水文站点, 积分下限也不能取得过深。该区域达到 700 m 的站点个数为 1531 个, 而达到 1000 m 的站点个数只有 848 个。

在每个压力面上对所有变量(盐度、温度、位势密度)相对于流函数参数  $\phi_{100-700}$  进行拟合, 图 2 为三个典型压力层面上温度和盐度的拟合曲线。

## 2 黑潮的 GEM 场分析

以苏澳海脊为界, 分别以 24°N 和 25°N 为中心选取数据窗口构建 GEM 温、盐场, 在此基础上研究黑潮在此区域的时空变化特征。

### 2.1 黑潮热带水

图 3—图 5 为流函数空间投影所得到的 GEM 温、盐场, 从中对黑潮次表层热带水进行分析, 结果表明: 黑潮 300 m 以浅次表层水的温度和盐度从西向东递增; 在相同流函数值下, 每个压力面上苏澳海脊北边的盐度要低于南边的盐度。从图 4 来看, 黑潮次表层

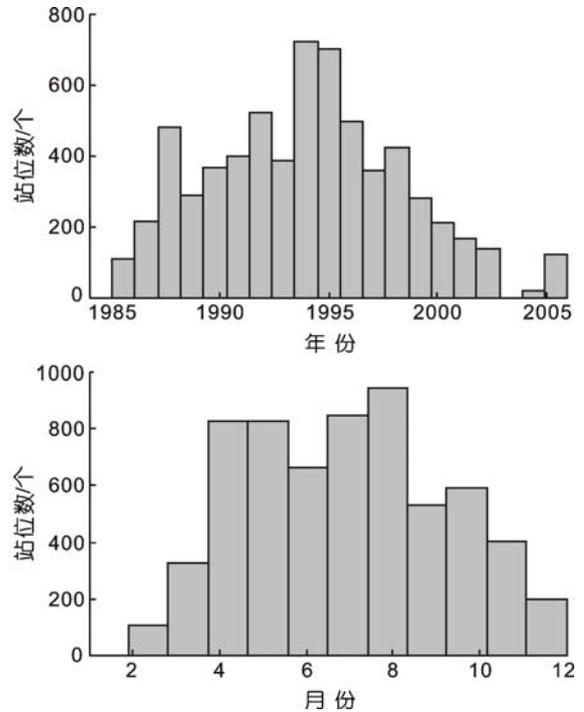
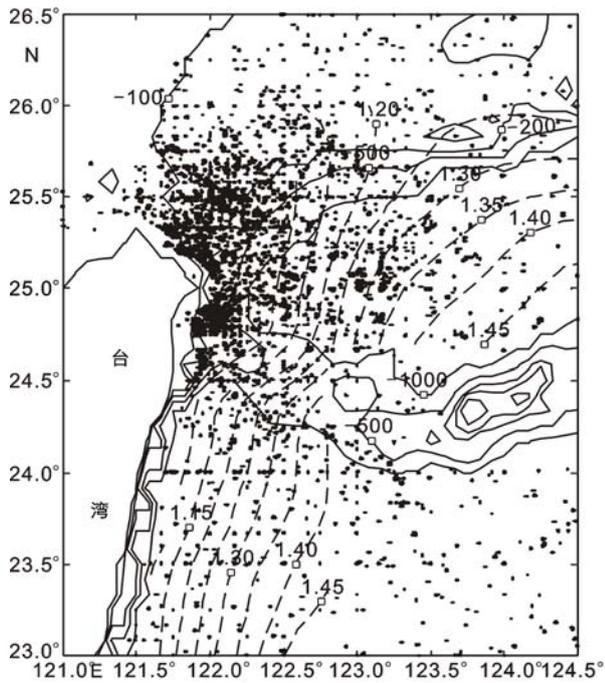


图 1 台湾东北海底地形、100—700 m 平均动力高度场和历史水文站点分布(右上)以及这些站点的年月分布(右下)  
 Fig.1 Bathymetry, mean dynamic height field and historical hydrographic stations northeast of Taiwan(right top), Histogram of hydrographic station deployment by year and month (left bottom)

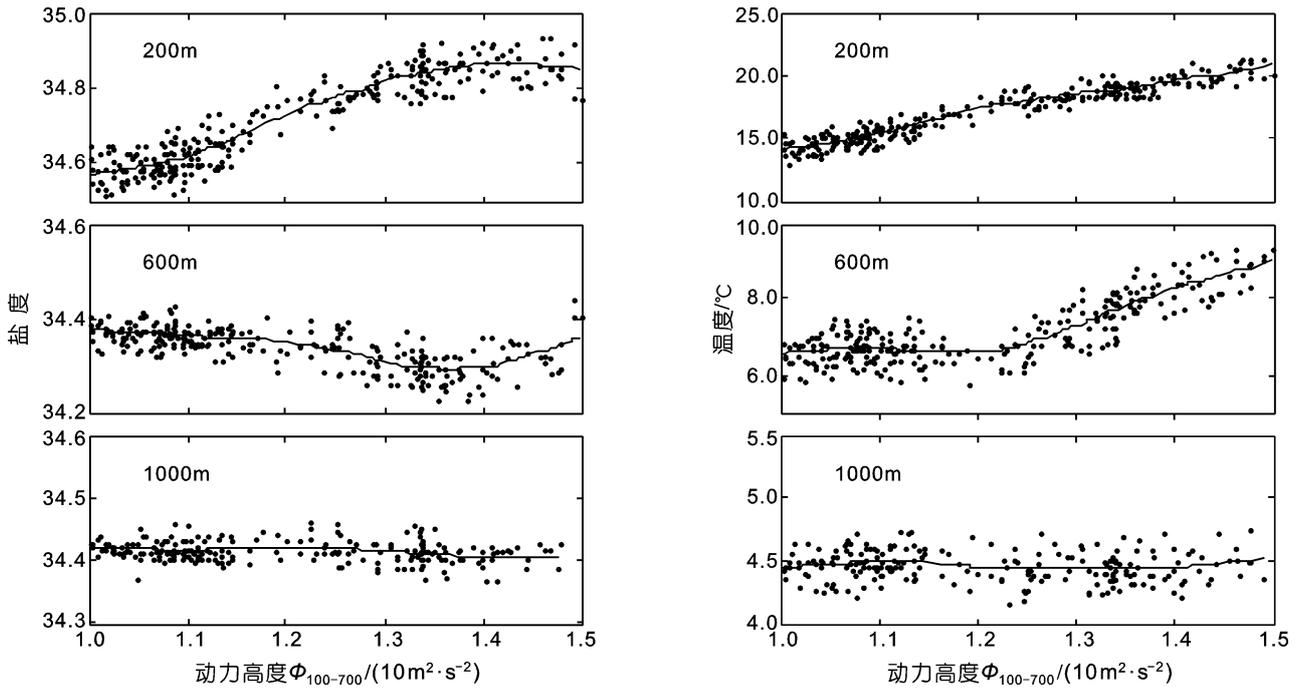


图 2 盐度、温度相对于流函数的拟合曲线

Fig.2 Fitting curves for salinity and temperature at three depths

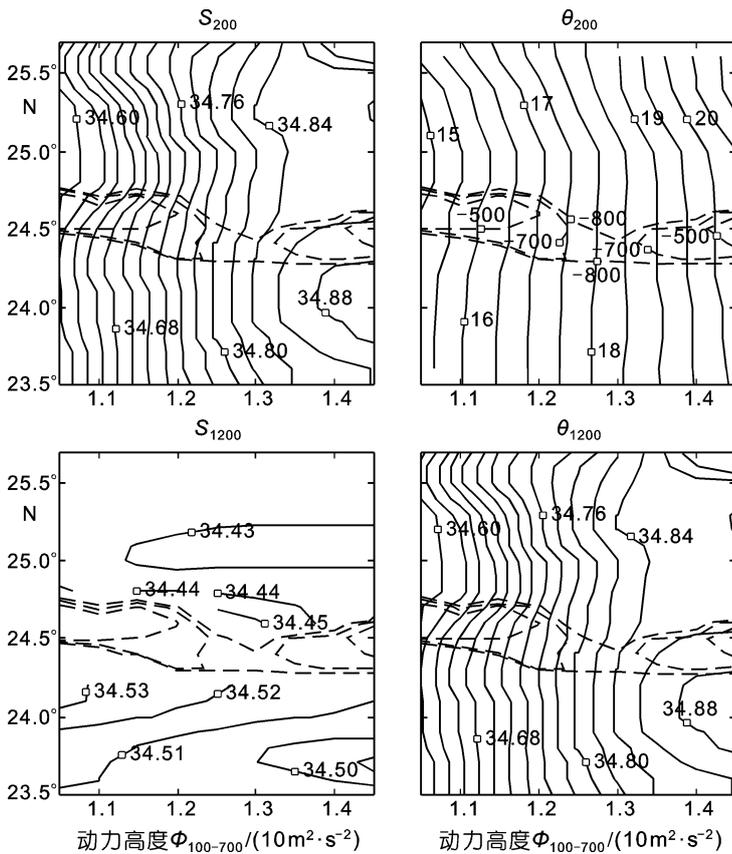


图 3 GEM 场 200 m 和 1200 m 的水平分布(左为盐度、右为温度), 点划线为苏澳海脊地形

Fig.3 GEM salinity field (left) and temperature field (right) at 200 m and 1200 m. The dash-dotted lines represent the Su-Ao Ridge

水经过苏澳海脊后盐度和温度都有所降低, 尤其是黑潮的西半部。作者认为, 台湾东北部黑潮次表层水相对低温低盐的现象是由于东海陆架水对黑潮的影响, 这一点将在后文进一步讨论。

图 6 显示了黑潮浅层水的季节性变化, 其绘制的是以 25°N 为中心的纬度窗口, 分别按冬半年(10—3 月)和夏半年(4—9 月)的数据构造的温、盐 GEM 场, 结果表明, 黑潮次表层水的盐度是夏半年明显低于冬半年, 这是由于在夏半年黑潮和东海陆架发生强烈的水交换的结果。

### 2.2 黑潮中层水

比较 GEM 场可以发现, 冲绳海槽中的黑潮中层水相对于苏澳海脊以南的黑潮中层水具有低温高盐的特征, 反映了海脊的阻挡作用(图 4)。在苏澳海脊北部位于冲绳海槽西南角的黑潮中层水具有局部盐度最大值的特征, 盐度明显高于周围海区, 高盐中心位置在北纬 25°N, 深度在 500 m 左右(图 5)。同样作者分析了位于冲绳海槽内黑潮中层水的季节性变化(图 6), 其中 500 m 附近温度、盐度的升高不是来自非绝热过程, 而是反映了中层水核心在夏季伴随黑潮偏离陆

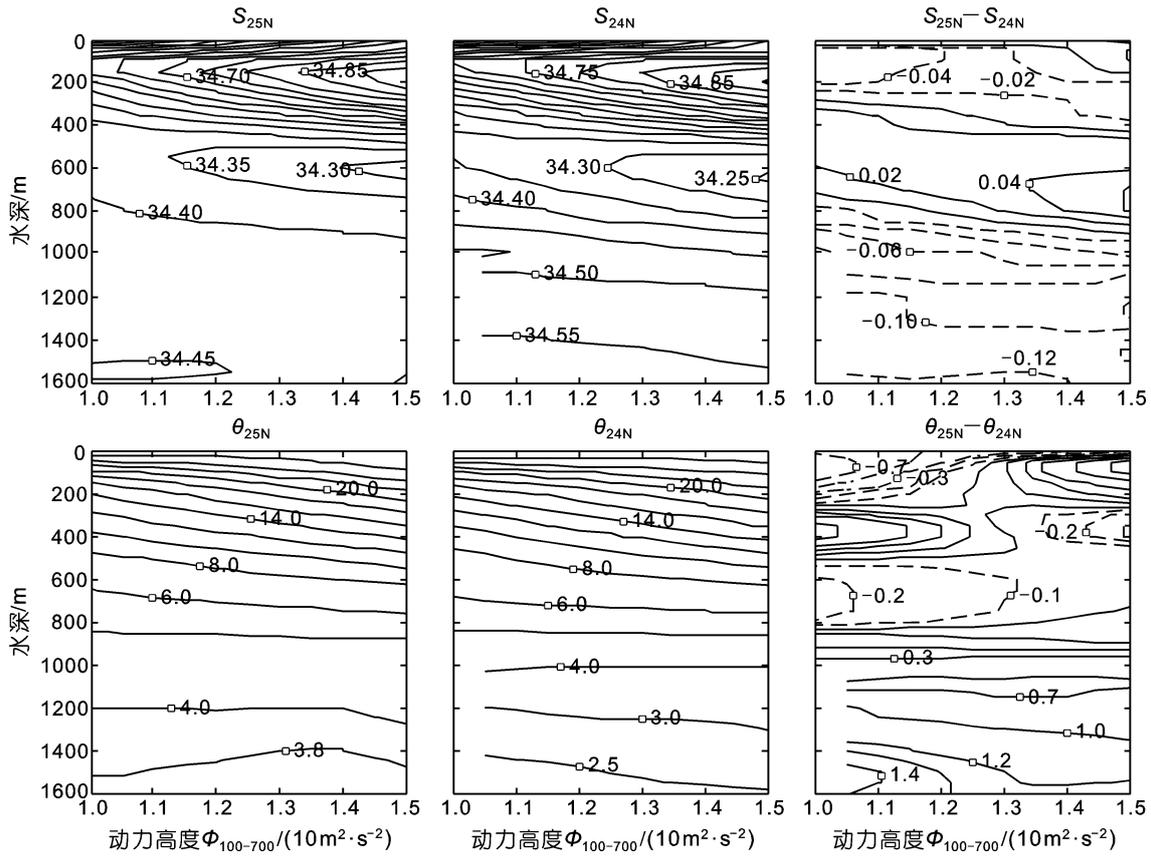


图4 24°N 和 25°N 盐度和温度的 GEM 场及其差值

Fig.4 GEM salinity and temperature fields at 24°N and 25°N and their differences

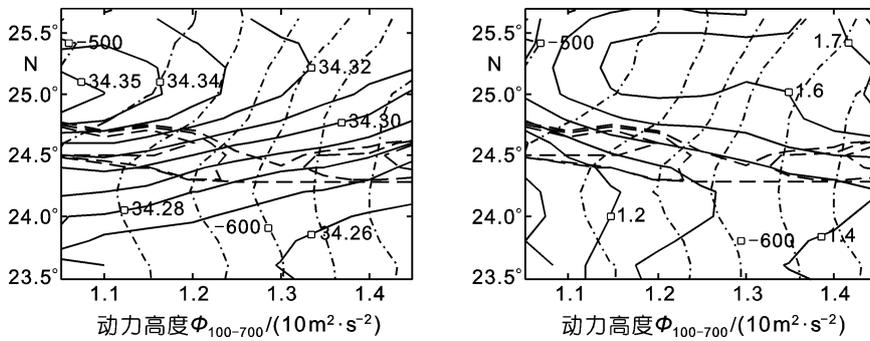


图5 26.8 等密度面上的盐度(左)和位涡(右)分布。点虚线为 26.8 等密度面的深度分布; 位涡单位是  $10^{-7}m^{-1}s^{-1}$

Fig.5 Salinity (left) and potential vorticity (right) on 26.8 isopycnal surface. The dashed curves represent the pressure distribution on isopycnal. The unit of PV is  $10^{-7}m^{-1}s^{-1}$

架而下沉的现象。

### 2.3 黑潮深层水

对于 1000 m 以深的黑潮深层水, 从图 3 和图 4 可以看出, 苏澳海脊北部冲绳海槽内的深层水和苏澳海脊南部的深层水是两种不同性质的水团: 北部的深层水具有高温低盐的特性, 而南部则低温高盐, 温度的差值高达  $1^{\circ}C$ , 而盐度的差值也高达 0.1。这是

由于苏澳海脊的阻挡作用使得南部的深层水不能向北进入到冲绳海槽内。

### 3 讨论

对台湾东北部冲绳海槽西南角黑潮中层水出现高盐中心的原因, 下面进行简要的讨论。图 5 绘制了 26.8 等密度面上的位涡分布, 结果显示, 位涡通过苏澳海脊前后变化较大, 反映了地形对黑潮中层水的阻挡作用。从南海流出的中层水在

$122^{\circ}E$  附近加入黑潮, 黑潮中层水由两部分组成, 西半部分是从南海流出的中层水, 东半部分是西菲律宾海的中层水。

对于台湾东北尖角气旋式冷涡回流的影响, 通过流函数投影, 做了 50 m 相对于 200 m 的动力高度分布并对结果进行地转经验模态诊断分析; 图 7 表明在台湾东北部全年存在一个冷涡, 夏季较强且位

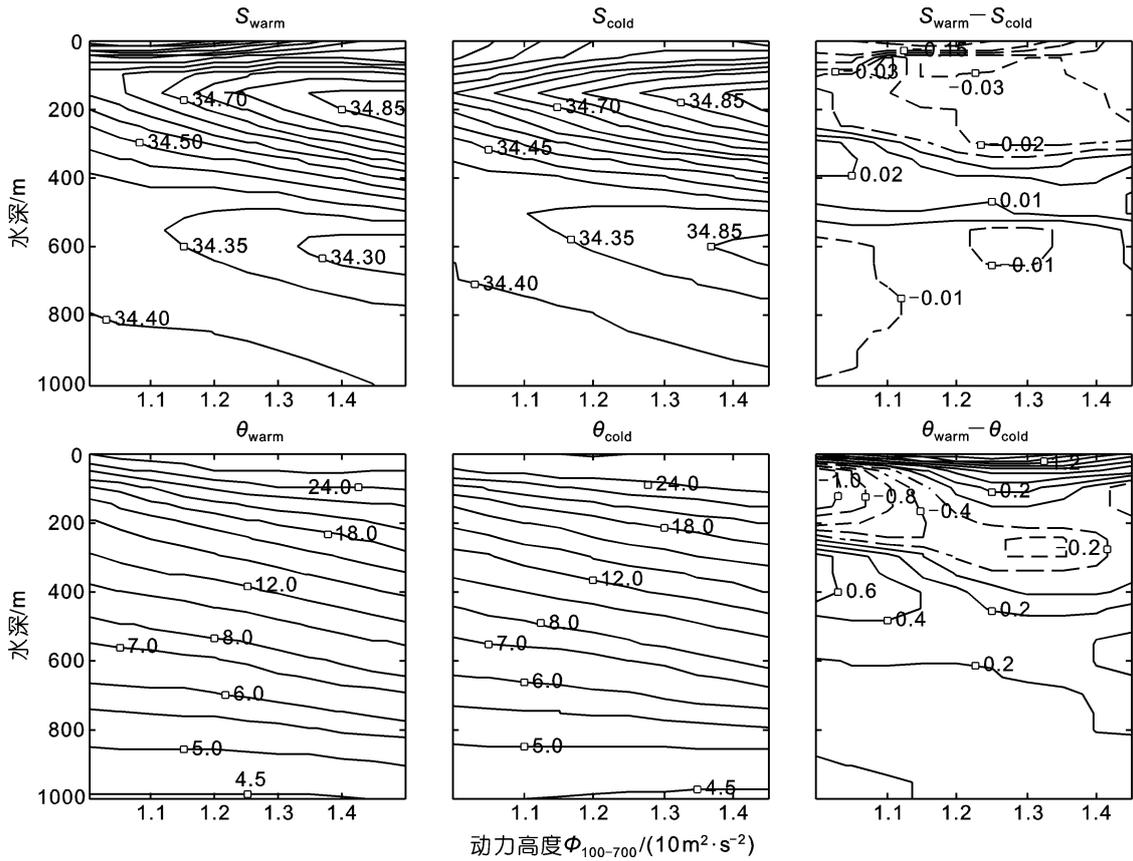


图 6 25°N GEM 冷暖半年温、盐场及其差值, 分为冬半年(10—3月)和夏半年(4—9月)

Fig.6 GEM salinity and temperature fields at 25°N and the differences between warm half-year (Oct.—Mar.) and cold half-year (Apr.—Sep.)

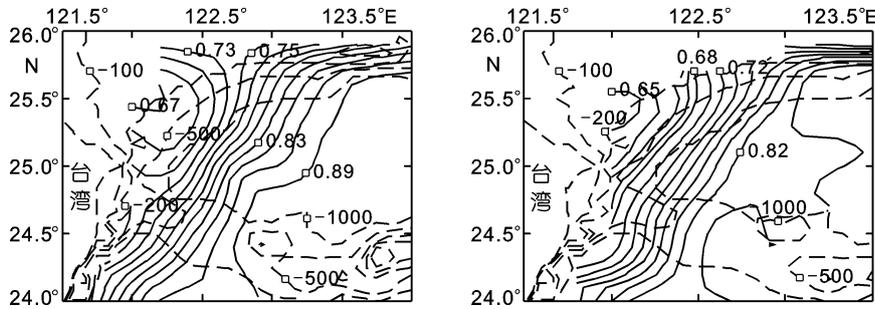


图 7 50—200 m 平均动力高度场, 左图为夏半年(4—9月), 右图为冬半年(10—3月)

Fig.7 Mean dynamic height field at 50—200m in warm half-year (left) and cold half-year (right)

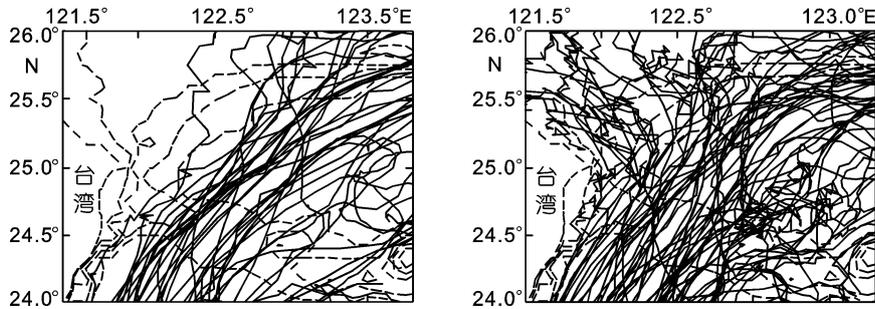


图 8 漂流浮标路径[左夏季(6—8月), 右冬季(12—2月)]

Fig.8 Tracks of drifters in summer (Jun.-Aug., left) and winter (Dec.—Feb., right)

置偏南。图 8 是 Argos 漂流浮标路径的季节性分布, 从中可以看出黑潮流轴夏季偏离陆架, 有利于台湾东北部气旋冷涡的形成, 而冬季向西冲上陆架的浮标较多。从图 3 可知, 此气旋式回流对该地区温、盐分布的影响, 由于此回流造成的局部垂直混合及苏澳海脊的阻挡改变了黑潮中层水低盐核的特性, 使黑潮中层水在冲绳海槽西南角产生高盐中心; 对于是苏澳海脊的阻挡作用还是气旋式回流作用占主导地位及其相互作用, 准备采用数值模拟的方式进行研究, 这是下一步的工作内容。

致谢 本文数据由美国国家海洋数据中心(National Oceanographic Data Center)提供下载, 谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- 刘在科, 胡敦欣, 孙 澈, 2008. PN 断面东海黑潮的地转经验模态分析. 海洋与湖沼, 39(3): 197—201
- 孙湘平, 1987. 东海黑潮表层流路(途径)的初步分析. 黑潮调查研究论文集. 北京: 海洋出版社, 1—13
- 苏纪兰, 潘玉球, 1989. 台湾以北陆架环流动力学初步研究. 海洋学报, 11: 1—14
- 修树孟, 黄浩升, 2006. 台湾东北近海冬季上升流的数值模拟研究. 水动力学研究与进展. 21(3): 331—338
- 袁耀初, 苏纪兰, 2000. 1995 年以来我国对黑潮及琉球海流的研究. 科学通报, 45(22): 2353—2356
- 郭炳火, 汤毓祥, 葛人峰等, 2000. 台湾暖流和入侵陆架黑潮水的季节变化. 海洋学报, 22(增刊): 24—38
- 管秉贤, 1978. 我国台湾及其附近海底地形对黑潮途径的影响. 海洋科学集刊, 14: 1—21
- Chao S, 1990. Circulation of the East China Sea, a numerical study. J Oceanogr Soc Japan, 46: 273—295
- Chen C, Ruo R, Pai S *et al*, 1995. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan. Continental Shelf Research, 15: 19—39
- Chern C, Wang J, 1994. Influence of the seasonal thermocline on the intrusion of Kuroshio across the continental shelf northeast of Taiwan. Journal of Oceanography, 50: 691—711
- Guo X, Miyazawa Y, Yamagata T, 2006. The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: the origin of the Tsushima Warm Current. Journal of Physical Oceanography, 36: 2205—2231
- Hsueh Y, Wang J, Chern C, 1992. The intrusion of the Kuroshio across the continental shelf northeast of Taiwan. Journal of Geophysical Research, 97: 14323—14330
- Hsueh Y, Chern C, Wang J, 1993. Blocking of the Kuroshio by the continental shelf northeast of Taiwan. Journal of Geophysical Research, 98: 12351—12359
- Lee J, Matsuno T, 2007. Intrusion of Kuroshio Water onto the Continental Shelf of the East China Sea. Journal of Oceanography, 63: 309—325
- Lin C, Shyu C, Shih W, 1992. The Kuroshio fronts and cold eddies off northeastern Taiwan observed by NOAA-AVHRR imageries. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 3: 225—242
- Liu K, Gong G, Shyu C *et al*, 1992. Response of Kuroshio upwelling to the onset of northeast monsoon in the sea north of Taiwan: observations and a numerical simulation. Journal of Geophysical Research, 97: 12511—12526
- Nitani H, 1972. The beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K ed. Kuroshio. University of Tokyo Press, Tokyo, 129—156
- Qiu B, Imasato N, 1990. A numerical study on the formation of the Kuroshio countercurrent and the Kuroshio branch current in the East China Sea. Continental Shelf Research, 10: 165—184
- Sun C, Watts D, 2001. A circumpolar gravest empirical mode for the Southern Ocean hydrography. Journal of Geophysical Research, 106: 2833—2856
- Sun C, Watts D, 2002. A view of ACC fronts in streamfunction space. Deep-Sea Research, 49: 1141—1164
- Tang T, Hsueh Y, Yang Y *et al*, 1999. Continental slope flow northeast of Taiwan. Journal Physical Oceanography, 29: 1353—1362
- Tang T, Tai J, Yang Y, 2000. The flow pattern north of Taiwan and the migration of the Kuroshio. Continental Shelf Research, 20: 349—371

## HYDROGRAPHY OF THE KUROSHIO NORTHEAST OF TAIWAN WITH A STREAMFUNCTION PROJECTION METHOD

YING Rui-Gong<sup>1,2</sup>, YAN Xiao-Mei<sup>1,2</sup>, SUN Che<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

**Abstract** A streamfunction projection method called Geostrophic Empirical Mode (GEM) was used to diagnose the historical hydrographic data in the Kuroshio northeast of Taiwan. By examining the spatial and seasonal variations of the GEM fields, we found that the Kuroshio Shallow Water (<300 m) in the Okinawa Trough is fresher and colder than that south of the Su-Ao Ridge. It provides evidence that the returning branch of the cyclonic cold eddy north of Taiwan exerts a strong influence on the water properties in the southern Okinawa Trough. Meanwhile, the Kuroshio Deep Water (>1000 m) is comparatively fresher and warmer within the Okinawa Trough, reflecting the topographic blocking on the Kuroshio Deep Water mass by the ridge. A regional salinity maximum of the Kuroshio Intermediate Water (KIW) was revealed in southwestern corner of the Okinawa Trough, which is, in hypothesis, the result of the intensive mixing in the confluence region between the Kuroshio and the perennial cold eddy.

**Key words** Kuroshio, Geostrophic Empirical Mode, Kuroshio Intermediate Water, Cold eddy