

# 台湾以东中尺度涡对黑潮入侵东海路径的影响

程建婷<sup>1,2,3</sup>, 杨德周<sup>1,2,4</sup>, 尹宝树<sup>1,2,4,5</sup>, 齐继峰<sup>1,2</sup>, 陈海英<sup>1,2</sup>, 冯兴如<sup>1,2</sup>,  
时云龙<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266071; 5. 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 利用 AVISO 数据集的卫星高度计资料, 分析了中国台湾以东中尺度涡的时空特征, 通过具体的中尺度涡实例探讨了其对台湾以东黑潮路径的影响。研究表明气旋式中尺度涡在春夏季节的数目要少于反气旋式中尺度涡, 在秋冬季节气旋式涡旋个数则多于反气旋涡; 并且台东以东区域涡旋传播存在多种路径, 涡旋的存在对台湾东北部黑潮入侵东海的路径具有重大影响, 特别是 2004 年夏季台湾以东区域存在多个涡旋, 相应的吕宋海峡黑潮主轴向东偏移明显, 台湾东北黑潮入侵东海的路径发生了显著变化。

**关键词:** 中国台湾以东; 中尺度涡; 黑潮; 入侵路径

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)02-0081-08  
DOI: 10.11759/hyxx20160308001

中尺度涡时间尺度从几天到几百天, 空间尺度从几十公里到几百公里<sup>[1]</sup>。中尺度涡含有巨大的动能, 大约占海洋环流总动能的 80%以上<sup>[2-4]</sup>, 能同时进行能量输送和物质传递, 影响温、盐等要素的分布<sup>[5]</sup>。世界大洋的所有区域几乎都存在着中尺度涡<sup>[6-7]</sup>, 并且中尺度涡在中国台湾以东区域十分活跃, 有一部分中尺度涡会向西传播至黑潮范围内<sup>[8]</sup>。黑潮携带着低纬度的高温、高盐水, 传递着太平洋的物质及能量, 在台湾东北部入侵东海陆架<sup>[9]</sup>, 影响东海环流系统和生态系统<sup>[10]</sup>。次表层富含营养盐的黑潮入侵东海分支的变化对于中国长江口外的生态环境影响极大, 因为低温高磷酸盐的黑潮次表层水可以通过上升流, 上升到真光层, 从而影响长江口外海域赤潮的发生<sup>[11]</sup>。目前关于中尺度涡和黑潮的研究表明, 台湾以东的中尺度涡传播至黑潮范围, 会导致黑潮进入东海的流量改变以及入侵东海过程发生变化<sup>[12-14]</sup>。Ichikawa 等<sup>[15]</sup>基于高频雷达和卫星高度计资料发现台湾以东中尺度涡会影响黑潮的流速和主轴位置, 黑潮变强对应着主轴位置远离东海陆架, 变弱对应着主轴位置向东海陆架的靠近。Gawarkiewicz 等<sup>[16]</sup>基于 HYCOM 再分析资料发现台湾以东低的海面高度异常, 即黑潮低流量, 对应着显著的黑潮入侵以及涡旋为气旋涡; 高的海面高度异常, 即黑潮的高流量, 对应着弱的黑潮入侵以及涡旋为反气旋涡。Vélez-

Belchí 等<sup>[17]</sup>基于历史浮标和卫星高度计资料发现来自西太平洋的气旋式中尺度涡会导致强的黑潮入侵。尽管如此, 关于中尺度涡对台湾东北黑潮入侵路径的影响及机理并不非常清楚, 特别是多涡情况以及中尺度涡旋传播路径对台湾东北次表层黑潮入侵分支路径如何影响尚没有研究。本文将从该区域中尺度涡的时空特征的统计分析出发, 以实际观测的涡旋为例, 研究不同的涡旋传播至台湾以东黑潮主流系范围时对黑潮入侵东海的影响。

## 1 数据和方法

本文所用的是基于绝对动力高度的地转流场, 卫星高度计资料来自 AVISO 数据集, 空间分辨率是 0.25°, 时间分辨率是 1 d, 发布时间从 1993 年 7 月至今。本文采用的是 1993~2013 年的数据, 共 21 a。

本文采取的涡旋探测方法是 Nencioli 基于几何矢量的涡旋探测算法<sup>[18]</sup>。此涡旋自动探测方法是建立在流场的几何形状上的, 由涡旋存在的速度区域

收稿日期: 2016-03-08; 修回日期: 2016-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476019, 41576023, 41376030)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41476019, No.41576023, No.41376030]

作者简介: 程建婷(1991-), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 物理海洋专业, 电话: 15610480958, E-mail: cjcheng@126.com; 杨德周, 通信作者, 副研究员, 主要从事近海大洋相互作用的研究, 电话: 0532-82898931, E-mail: yangdezhou@qdio.ac.cn

的一般特征推出 4 个约束条件。4 个约束条件如下：  
 (1)中心左右两侧，东西方向的速度方向相反，离涡旋中心越远速度量值越大；  
 (2)中心左右两侧，南北方向的速度方向相反，离涡旋中心越远速度量值越大；  
 (3)速度在涡旋中心处存在局部最小值；  
 (4)在涡旋中心周围，速度矢量的旋转方向恒定，相邻的速度矢量的方向位于同一个或者相邻的象限内。

其中涡旋中心位于所有约束条件都符合的区域，由流函数区域的封闭曲线获得涡旋的形状和大小，通过比较在连续时间步长的涡旋中心分布可以实现涡旋轨迹的追踪。

此约束条件需要指定两个常数，其中常数  $a$  定义的是速度沿坐标轴量级增加的网格数以及围绕涡旋中心速度矢量方向发生变化的曲线，常数  $b$  定义的是确定局部最小速度的网格数。对于 AVISO 数据集的特征和分辨率，本文进行敏感性实验确定了这两个常数的最佳值，即  $a=2, b=1$ ，并选取  $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ ,  $17^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$  作为数据分析的区域。

## 2 结果和分析

### 2.1 台湾以东区域中尺度涡的时空分布

本文季节按照春节 3~5 月份，夏季 6~8 月份，秋季 9~11 月份，冬季 12~翌年 2 月份的标准划分，图 1 和图 2 分别给出了逐月及季节的涡旋个数统计结果。从涡旋的总体分布可以发现，秋冬季节气旋涡个数多于反气旋涡，而在春夏季节，反气旋涡的个数要多于气旋涡(图 1)。由上述涡旋探测方法获得的涡旋轨迹可知，这些涡旋大部分是从外海传播过来的，局地生成的相对较少。

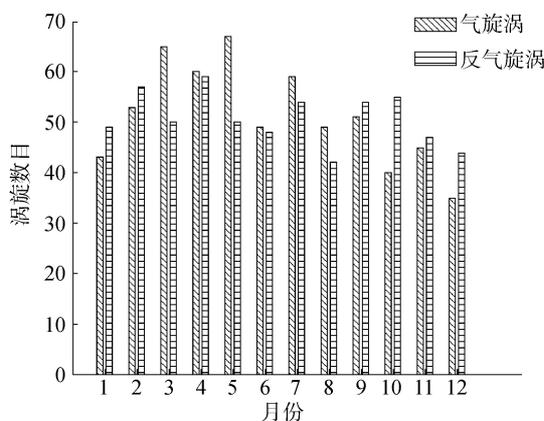


图 1 台湾以东区域中尺度涡旋数目逐月分布

Fig. 1 Monthly variability of mesoscale eddies' numbers in the east of Taiwan

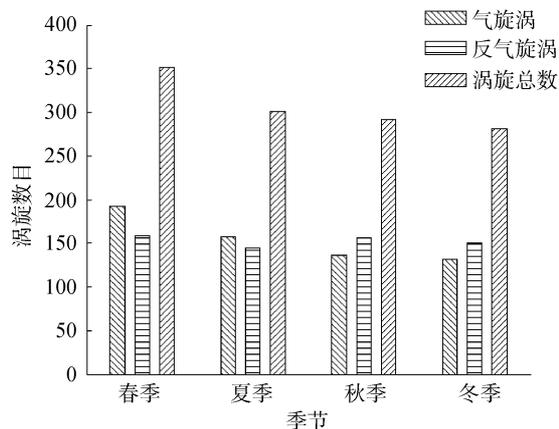


图 2 台湾以东区域中尺度涡旋数目季节分布

Fig. 2 Seasonal variability of mesoscale eddies' numbers in the east of Taiwan

图 2 给出了  $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ ,  $17^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$  区域的涡旋个数统计，结果显示为春季产生中尺度涡 351 个，其中 159 个气旋涡，192 个反气旋涡；夏季产生中尺度涡 301 个，其中 143 个气旋涡，158 个反气旋涡；秋季产生中尺度涡 292 个，其中气旋涡 156 个，反气旋涡 136 个；冬季产生中尺度涡 281 个，其中气旋涡 149 个，反气旋涡 132 个。涡旋的个数春季略多于其他季节，总体季节变化并不明显。在春、夏季，气旋涡少于反气旋涡，秋、冬季则气旋涡多于反气旋涡<sup>[19]</sup>。

### 2.2 中尺度涡的传播对黑潮入侵东海路径的影响

通过 4 个典型涡旋传播个例的分析，探讨中尺度涡对黑潮入侵东海路径的影响。图 3 是多年平均的气候态 SSHA(sea-surface height anomaly)背景场和绝对动力高度速度场，其中图 3 分别是夏季和秋季，反映的是黑潮气候态的动力高度流场的形态，下面的个例分析中将通过与其比较分析涡旋对黑潮入侵路径的影响。

#### 2.2.1 一号涡旋

图 4 为 2003 年 6 月份出现的一个反气旋式中尺度涡出现前后，绝对动力高度流场图的变化。其中 2003-06-15 黑潮在  $123^{\circ}\text{E}$ ,  $26^{\circ}\text{N}$  位置处有少部分的入侵；而 2003-06-24 图中标记的中尺度涡于次日消亡，而黑潮的入侵明显减弱，在  $123^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ ,  $25^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$  区域与 2003-06-15 时比较发生明显变化，黑潮流速也有增大。

#### 2.2.2 二号涡旋

图 5 为 2003 年 9 月份出现的一个气旋式中尺度涡出现前后，绝对动力高度流场图的变化。其中

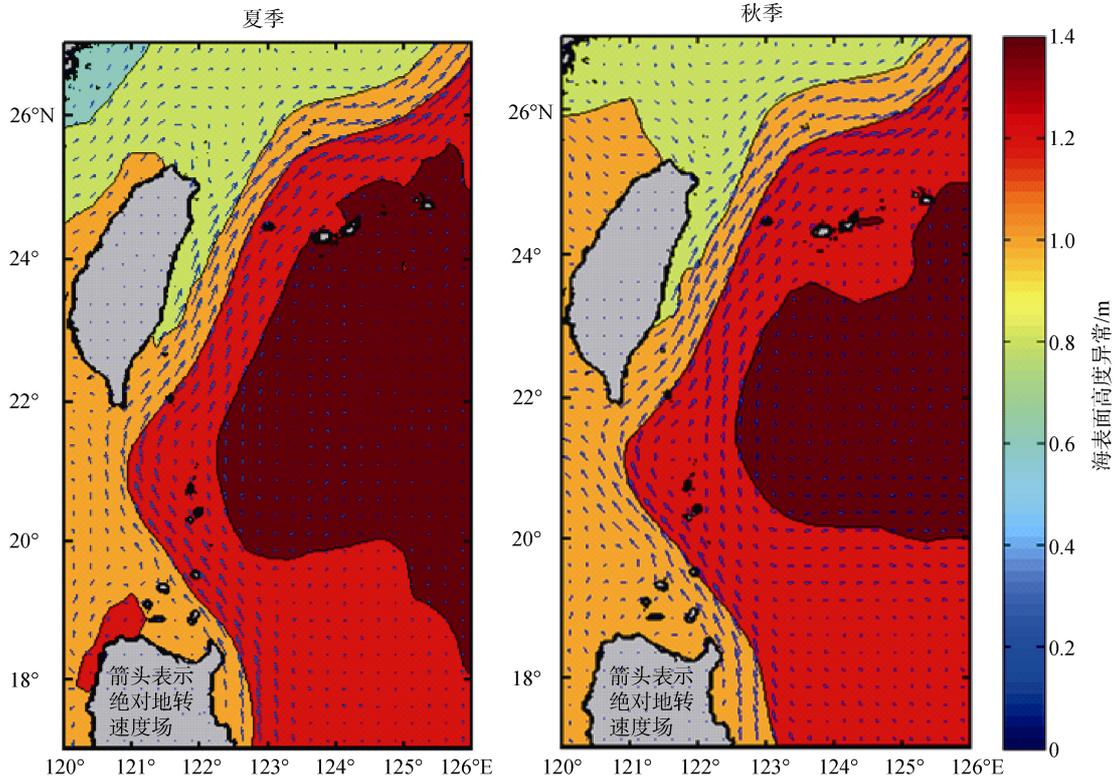


图3 气候态平均海表面高度异常以及相应的绝对地转速度场

Fig. 3 Climatological mean sea-surface height anomaly(SSHA) and corresponding absolute geostrophic velocity

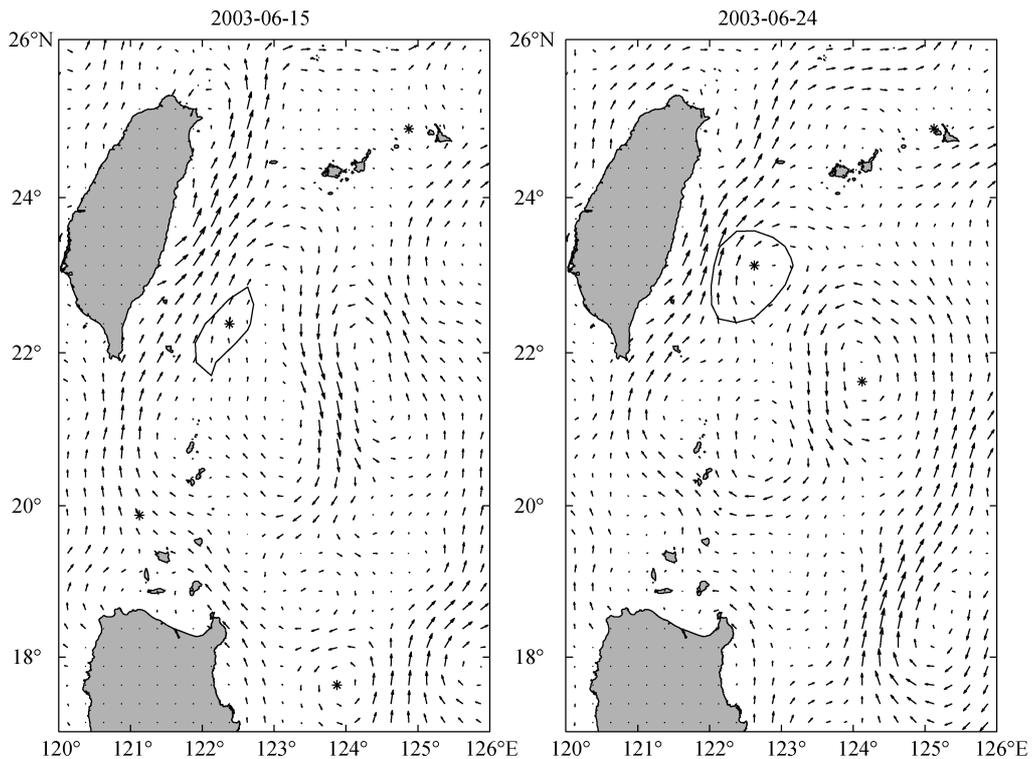


图4 台湾以东区域中尺度涡的第一个例子

Fig. 4 The first example of mesoscale eddies in the east of Taiwan

星号表示涡旋中心; 圆圈表示涡旋形状; 箭头表示绝对地转速度场; 图5、图6、图8同

an asterisk represents the center of the eddy; the circle represents the shape of the eddy; the arrow represents the absolute speed. Fig. 5, Fig. 6, Fig. 8 with the same

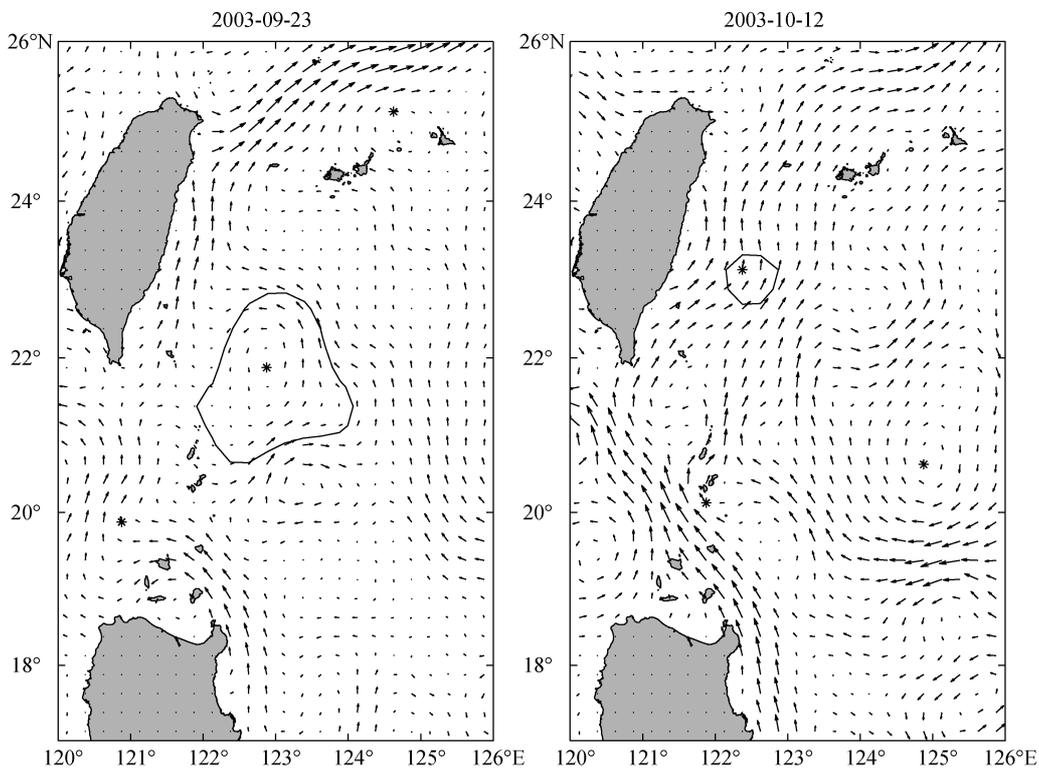


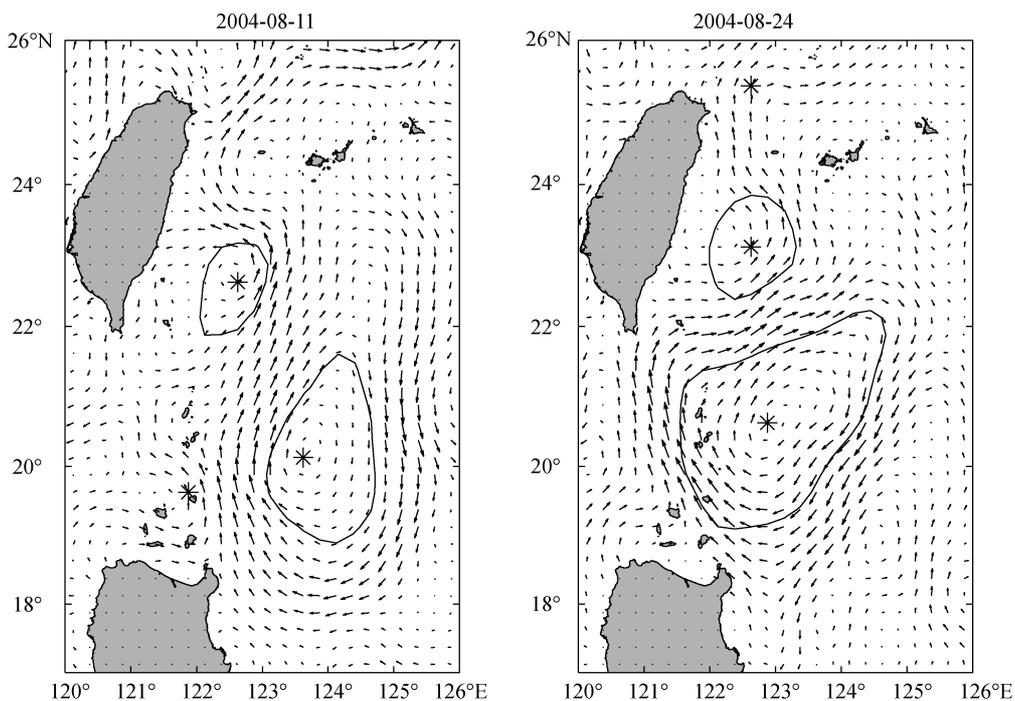
图5 台湾以东区域中尺度涡的第二个例子

Fig. 5 The second example of mesoscale eddies in the east of Taiwan

2003-09-23时黑潮路径几乎没有弯曲;而2003-10-12时黑潮路径略有弯曲,流速也明显减小。两个图作比较,除台湾东北部的区别外,台湾南部的黑潮流速也有显著区别。

### 2.2.3 三号涡旋

图6为2004年8月份出现的中尺度涡,相应的绝对动力高度流场的变化。其中时间分别为2004-08-11,2004-08-24,2004-09-06和2004-09-19。与气候



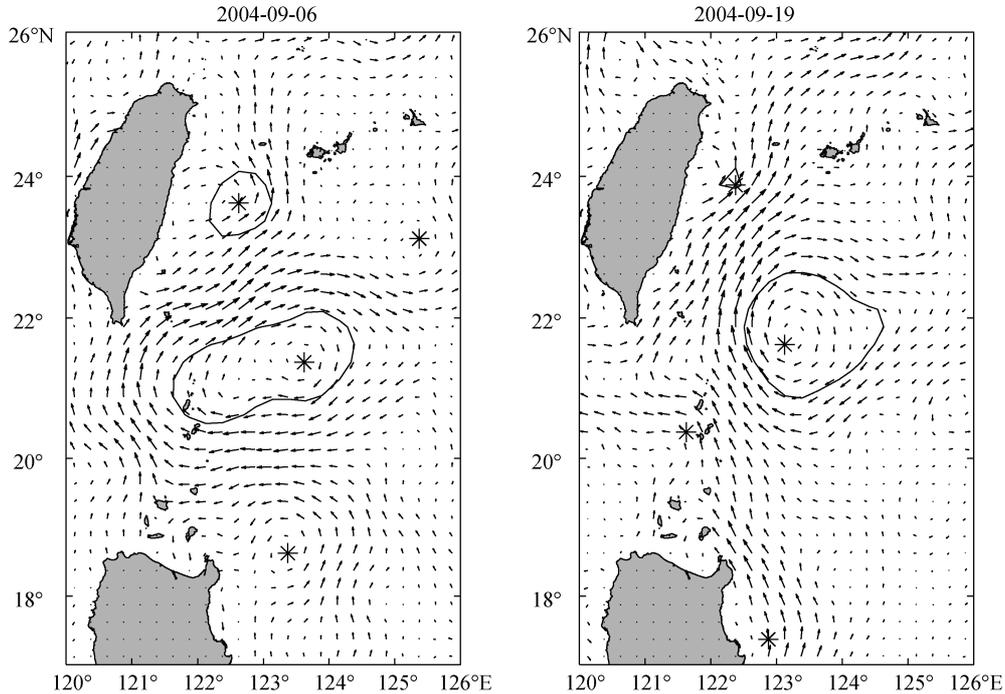


图 6 台湾以东区域中尺度涡的第三个例子

Fig. 6 The third example of mesoscale eddies in the east of Taiwan

态平均 SSHA(图 3)比较发现黑潮的路径变化非常大。而在 2004-09-19 中可以看出随着中尺度涡的消亡,黑潮的路径和流速又重新恢复正常。图 6 中的涡旋由图 7 中 3 个涡旋组成,其中涡旋 a 是气旋式涡旋,生命周期是 40 d,从 2004-08-11 到 2004-09-19; 涡旋 b 是反气旋式涡旋,生命周期是 18 d,从 2004-08-16 到 2004-09-04; 涡旋 c 是反气旋式涡旋,生命周期是 18 d,从 2004-09-09 到 2004-09-23。

对于这种情况,初步猜想是涡旋 a 和涡旋 b 或者涡旋 a 和涡旋 c 同时和黑潮相互作用,才导致如此明显的黑潮路径的变化。台湾东北的黑潮流速和方向都发生了显著变化,必然会导致黑潮入侵东海的变化,其输入的物质能量也会发生变化,这对东海的动力和生态环境会产生影响。

#### 2.2.4 四号涡旋

图 8 显示了 2008 年 9 月份出现的一个气旋式中尺度涡出现前后,黑潮路径的明显变化。黑潮开始是几乎没有入侵,随着此气旋涡的移动,黑潮入侵路径开始明显,同时黑潮流速开始减小。在这期间台湾以东的黑潮主轴也出现分支,一部分黑潮分支向琉球岛东侧流去。这与 Véléz-Belchí 等(2013)的研究结果相似。

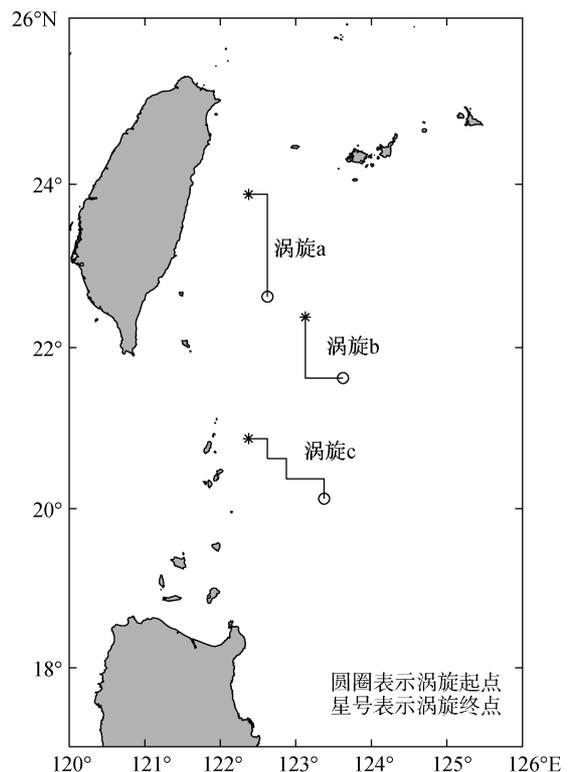


图 7 台湾以东第三组涡旋的轨迹

Fig. 7 The path of the third group of mesoscale eddies in the east of Taiwan

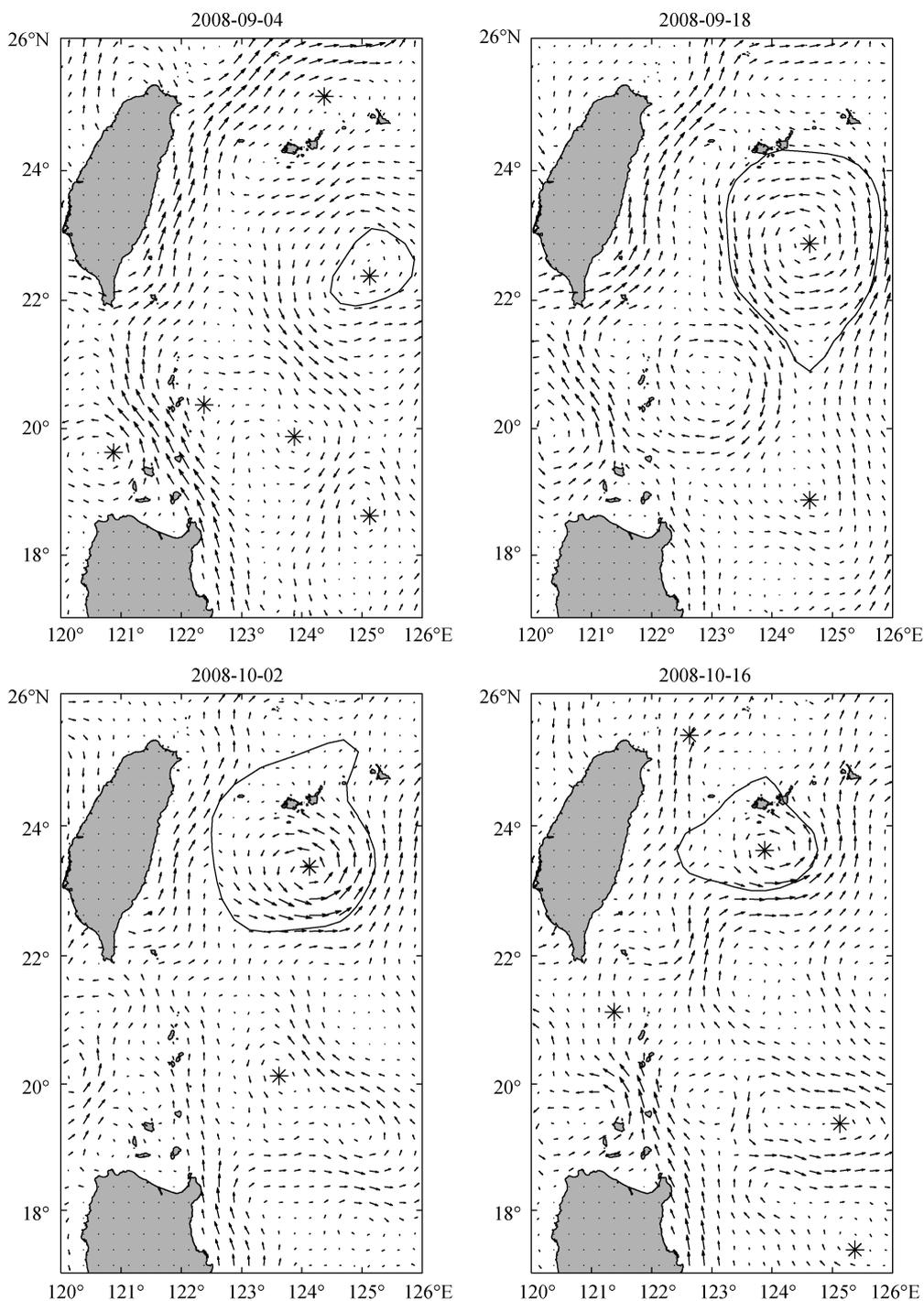


图 8 台湾以东区域中尺度涡的第 4 个例子

Fig. 8 The fourth example of mesoscale eddies in the east of Taiwan

图 9 为 4 号涡旋的运动轨迹, 出现时间为 2008-09-04, 消亡时间为 2008-10-16, 生命周期为 42 d。该尺度的中尺度涡对黑潮路径影响明显, 其使得台湾东北的黑潮发生了约 30°的逆时针转向(图 8), 使得黑潮直接冲上了陆架, 此时黑潮和东海的物质能量交换都会发生显著变化。

### 3 结论

本文基于 AVISO 21 年的卫星高度计资料对台湾以东中尺度涡的时空分布进行了统计并研究了典型中尺度涡传播对台湾东北黑潮入侵路径及流速的影响。研究显示, 涡旋有并不明显的季节分布, 春季的

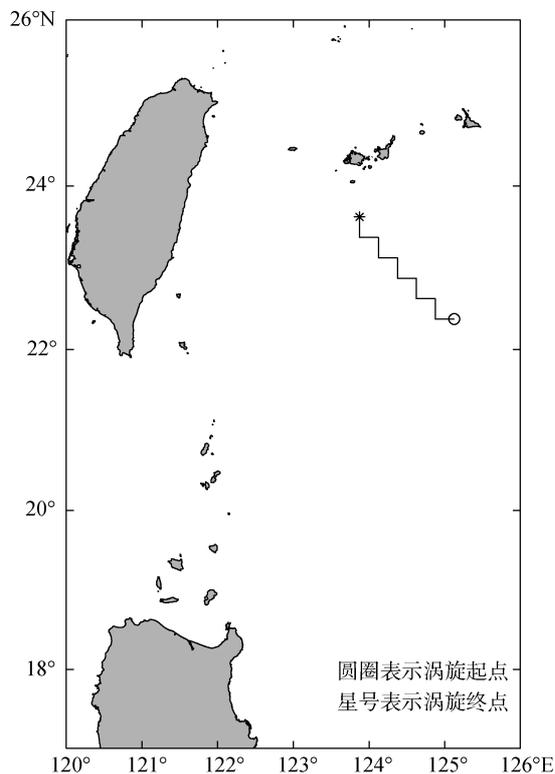


图9 四号涡旋的轨迹

Fig. 9 The path of the fourth example of mesoscale eddies in the east of Taiwan

涡旋个数略多；由季节分布统计得知，气旋式中尺度涡在春、夏两季的数目要少于反气旋式中尺度涡，在秋、冬季节则多于反气旋涡。4组典型实测涡旋研究进一步发现当较大气旋式中尺度涡传播至台湾以东黑潮主流系区域时，黑潮路径会发生明显弯曲，黑潮流速减小；同时2003年的1号涡旋的结果显示，当反气旋涡传播至台湾以东黑潮主流系区域时，黑潮入侵减弱，流速相应增加。由2004年的3组涡旋的探测结果显示，有多个涡旋传播至黑潮主流系区域时，相应的黑潮路径与气候态平均的SSHA场差别很大，说明中尺度涡对黑潮的影响更大而复杂。

虽然我们通过实测资料分析显示了中尺度涡对黑潮入侵东海路径的影响，但是中尺度涡的来源以及不同强度的中尺度涡对黑潮影响的差别还需要进一步深入的分析和研究。

参考文献:

[1] Zhang Zhengguang, Zhang Yu, Wang Wei, et al. Universal structure of mesoscale eddies in the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(14): 3677-3681.  
 [2] Robinson A R, McWilliams J C. The baroclinic instabil-

ity of the open ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1974, 4: 281-294.  
 [3] 郑聪聪. 北太平洋中尺度涡现象分析[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013.  
 Zheng Congcong. Analyses of mesoscale eddies in North Pacific[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.  
 [4] Xu Chi, Shang Xiaodong, Huang Ruixin. Horizontal eddy energy flux in the world oceans diagnosed from altimetry data[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5316-5316.  
 [5] Zhang Zhengguang, WangWei, Qiu Bo. Oceanic mass transport by mesoscale eddies[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 322-324.  
 [6] 杨光. 西北太平洋中尺度涡旋研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
 Yang Guang. A study on the mesoscale eddies in the Northwestern Pacific Ocean[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
 [7] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.  
 [8] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(15): 87-101.  
 [9] Guan Bingxian, Fang Guohong. Winter counter-wind currents off the southeastern China coast: A review[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(1): 1-24.  
 [10] Zhang Jing, Liu Sumei, Ren Jingling, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf[J]. *Progress in Oceanography*, 2007, 74(4): 449-478.  
 [11] Yang Dezhou, Yin Baoshu, Liu Zhiliang, et al. Numerical study on the pattern and origins of Kuroshio branches in the bottom water of southern East China Sea in summer[J]. *J Geophys Res*, 2012, 117(C2): 2014.  
 [12] 赵杰. 吕宋海峡东侧海区中尺度涡旋的统计特征及对黑潮平均流的影响初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
 Zhao Jie. The statistical characters of the mesoscale eddies on the east of the Luzon Strait and the influence to the Kuroshio current[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.  
 [13] 殷玉齐. 中尺度涡旋对台湾东北黑潮入侵影响及机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
 Yin Yuqi. A study on the impact of mesoscale eddies on Kuroshio intrusion variations northeast of Taiwan and its underlying mechanism[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.  
 [14] Sen J, Yiing J Y, Joe W, et al. Large variability of the

- Kuroshio at 23.75°N east of Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(3): 1825-1840.
- [15] Ichikawa K, Tokeshi R, Kashima M, et al. Kuroshio variations in the upstream region as seen by HF radar and satellite altimetry data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(21): 6417-6426.
- [16] Gawarkiewicz G, Jan S, Lermusiaux P F J, et al. Circulation and intrusions northeast of Taiwan: Chasing and predicting uncertainty in the cold dome.[J]. *Oceanography*, 2011, 24(4): 110-121.
- [17] Vélez-Belchi P, Centurioni L R, Lee D K, et al. Eddy induced Kuroshio intrusions onto the continental shelf of the East China Sea[J]. *Journal of Marine Research*, 2013, 71(2): 309-325(17).
- [18] Nencioli F, Dong C, Dickey T, et al. A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2010, 27(27): 564.
- [19] 林鹏飞. 南海和西北太平洋中尺度涡的统计特征分析[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005.  
Lin Pengfei. Statistical analyses on mesoscale eddies in the South China Sea and the Northwest Pacific[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2005.

## Detection of mesoscale eddies in the east of Taiwan and its impact on the path of the Kuroshio intrusion to the East China Sea

CHENG Jian-ting<sup>1, 2, 3</sup>, YANG De-zhou<sup>1, 2, 4</sup>, YIN Bao-shu<sup>1, 2, 4, 5</sup>, QI Ji-feng<sup>1, 2</sup>, CHEN Hai-ying<sup>1, 2</sup>, FENG Xing-ru<sup>1, 2</sup>, SHI Yun-long<sup>1, 2, 3</sup>

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 5. Marine Dynamics Process and Climate Functional Laboratory, Qingdao 266100, China)

**Received:** Mar. 8, 2016

**Key words:** the east of Taiwan; the mesoscale eddy; the Kuroshio; path of the Kuroshio

**Abstract:** In this study, the characteristics of mesoscale eddies in the east of Taiwan are studied with the AVISO-datasets of satellite altimeter data. The impact of the Kuroshio intrusion induced by mesoscale eddies with four examples has been discussed. The conclusions are summarized as follows: (1) the number of cyclonic eddies is smaller than that of anticyclonic eddies in the spring and summer and larger in autumn and winter; (2) when the anticyclonic eddies are transported to the scope of the Kuroshio, the path of the Kuroshio will weaken and its velocity of will increase; (3) when the cyclonic eddies are transported to the scope of the Kuroshio, the Kuroshio intrusion will enhance and the velocity of the Kuroshio will decrease; (4) if there are more than one eddies transported to the scope of the Kuroshio, the path of the Kuroshio will be significantly changed.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)