

# 吕宋海峡附近中尺度涡特征的统计分析

林宏阳<sup>1</sup>, 胡建宇<sup>1,2\*</sup>, 郑全安<sup>2,3</sup>

(1. 厦门大学 海洋学系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005;  
3. 马里兰大学 大气与海洋科学系, 马里兰, 美国)

**摘要:** 采用 1993 年 1 月到 2008 年 12 月 16 a 融合海面高度距平数据, 追踪吕宋海峡附近海域 ( $18^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ ) 中尺度涡的移动轨迹, 结果表明: 时间分辨率为 7 d 的卫星高度计资料难以观测到中尺度涡从西北太平洋通过吕宋海峡传进南海的过程, 但对 1994 年吕宋海峡中部观测到的一个气旋涡及其附近中尺度涡的运动轨迹进行分析可见, 西北太平洋海面高度变化会与吕宋海峡内部海面高度耦合后向南海传播。海面高度距平数据的时间-经度图表明, 西北太平洋海面高度变化信号在西传至吕宋海峡附近 ( $121^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ ) 时出现信号不连续。对  $21^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$  断面的海面高度距平数据按周期分别为 1~3 月、3~6 月、330~390 d (年信号) 进行分段带通滤波, 发现不同周期的西北太平洋信号穿过吕宋海峡传入南海受到的阻隔作用、向西传播的速度以及它们所受的强迫机制均不同。

**关键词:** 吕宋海峡; 中尺度涡; 卫星高度计数据

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2012)01-0001-07

## 1 引言

吕宋海峡位于台湾岛和吕宋岛之间(见图 1、图 2), 南北宽约 350 km, 是南海与西北太平洋之间的重要通道。由于其特殊位置, 吕宋海峡及其附近海域的环流结构、水交换等科学问题是海洋界研究的热点<sup>[1-6]</sup>。中尺度涡作为一种海洋中尺度现象, 对于大洋的能量传输起到重要的作用<sup>[7]</sup>。吕宋海峡附近的中尺度涡研究对于了解南海与西北太平洋的水交换有重要意义。由于现场观测资料有限, 早期吕宋海峡附近有关中尺度涡的研究多为事件性报道<sup>[8-10]</sup>, 也有应用数值计算模式模拟该区域的中尺度涡活动以研究黑潮的入侵时间及入侵形式等问题<sup>[11-18]</sup>。随着卫星高度计技术的发展和数据的积累, 海面高度资料已成为研究吕宋海峡附近中尺度涡动态过程的一种重要数据源。如李燕初等<sup>[19-20]</sup>、

郭景松等<sup>[21]</sup>、靖春生等<sup>[22]</sup>均曾利用卫星高度计资料对吕宋海峡附近的中尺度涡进行研究与分析。

关于西北太平洋的中尺度涡或中尺度波动能否通过吕宋海峡传进南海的问题一直为海洋界所关注。Hu 等<sup>[23]</sup>曾应用 TOPEX/Poseidon (以下简称 T/P) 卫星高度计资料分析南海及其邻近海域的海面高度变化指出, 周期为 3~6 个月的海面高度距平信号有时会穿过吕宋海峡传进南海; Yuan 等<sup>[24]</sup>利用卫星遥感的水色、海表温度及高度计数据研究了吕宋海峡附近黑潮的表面路径, 指出约有 30% 的时间会发生黑潮反气旋式地入侵南海的事件, 并且通过统计表明 1992 年末至 2005 年初的入侵事件中, 大部分都伴随着涡旋的脱落; Sheu 等<sup>[25]</sup>认为秋、冬季节, 黑潮会以流套形式入侵南海, 且北赤道流分叉点的北移会减弱黑潮输运和横跨流方向的位势涡度梯度, 从而使涡旋很可能会自由地跨越吕宋海峡从

收稿日期: 2010-09-09; 修订日期: 2011-08-09。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB411803; 2009CB421208); 国家自然科学基金(40976013; 40821063)。

作者简介: 林宏阳(1987—), 男, 福建省泉州市人, 硕士研究生, 从事物理海洋学研究。

\* 通信作者: 胡建宇, 教授。E-mail: hujy@xmu.edu.cn

太平洋传进南海;最近,Zheng 等<sup>[26]</sup>应用海面高度数据观测到 2004 年 6 月末至 7 月中旬一次反气旋涡穿越吕宋海峡的实例,并分析了这一过程涡与黑潮的相互作用。

本文用 AVISO 提供的融合海面高度距平数据追踪 1993 年至 2008 年吕宋海峡附近的中尺度涡移动轨迹,研究中尺度涡通过吕宋海峡的统计特征与实例,并通过分段带通滤波方法分析西北太平洋的海面高度变化信号传入南海的特征。

## 2 数据及处理方法

本文采用 AVISO 提供的 1993 年 1 月到 2008 年 12 月共 16 a 的 T/P、Jason 和 ERS1/2 等卫星高度计的融合海面距平(MSLA)数据(距平值是相对 1993—1999 年的平均值),对吕宋海峡附近海域( $18^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ )的中尺度涡进行轨迹追踪。该数据采用墨卡托投影,经向空间分辨率为( $1/3^{\circ}$ ),覆盖范围为南、北纬  $82^{\circ}$ ,时间分辨率为 7 d,已经过潮汐和海面气压校正。

本文借鉴 Wang 等的识别标准<sup>[27]</sup>采用如下中尺度涡判别标准:(1)SLA 的等值线闭合;(2)中尺度涡的中心位置水深不小于 1 000 m;(3)中尺度涡中心和最外层闭合等值线的高度差(以下简称“高度差”)不小于 7.5 cm;(4)中尺度涡持续存在时间不短于 4 周。由于吕宋海峡附近中尺度涡的存在时间较短,本文略去标准(4),且根据研究需要相应调整标准(2),(3)。另外,本文关于中尺度涡的“传播”定义如下:相邻两个时间点(相隔 7 d)的涡中心距离小于  $1.5^{\circ}$  的视为同一个涡,即该涡是由上一个时间点移动至下一个时间点的;“初始产生位置”则表示第一次在研究区域内出现的涡中心位置。

## 3 结果与分析

### 3.1 吕宋海峡附近中尺度涡轨迹

按照上述中尺度涡识别标准(1),(2)和(3),我们得到涡中心水深不小于 1 000 m、高度差不小于 7.5 cm,1993—2008 年研究区域内每年产生的中尺度涡分布及其产生后的移动轨迹图,如图 1 所示。

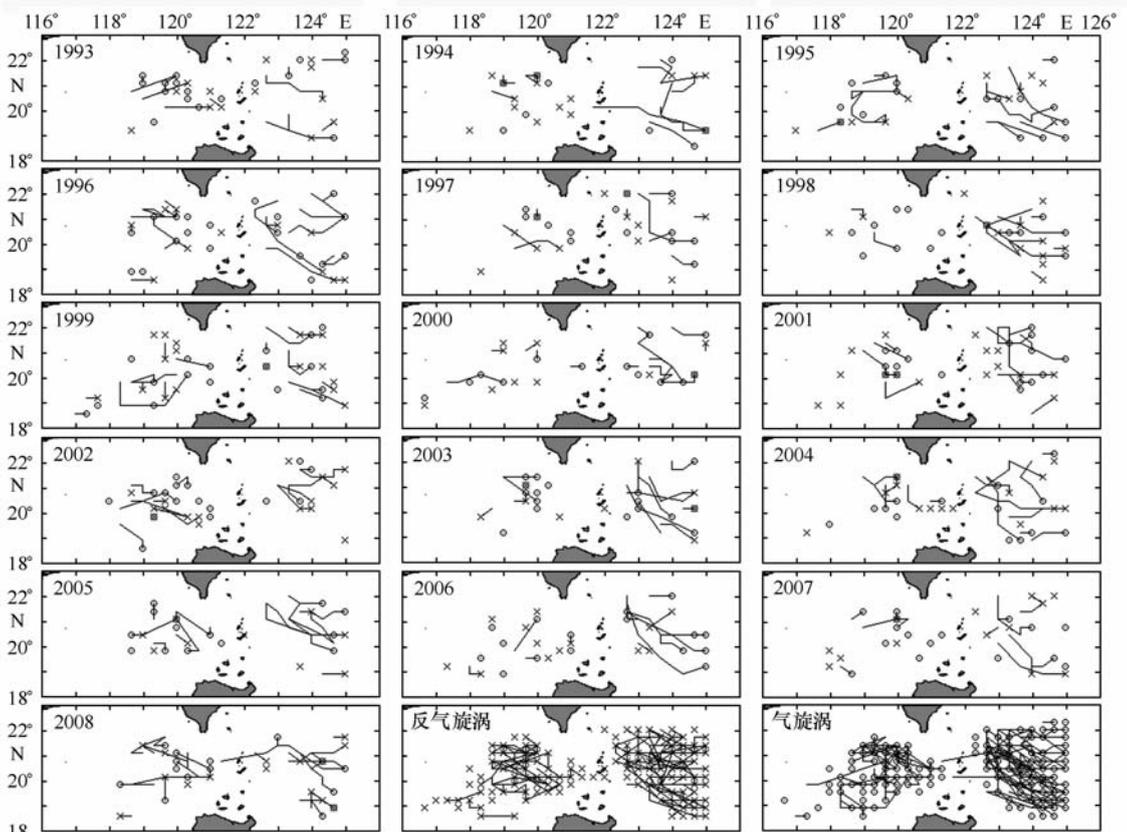


图 1 吕宋海峡附近中尺度涡的年际分布及轨迹

在涡中心水深大于 1 000 m,高度差不小于 7.5 cm 的标准下。×号和○号分别表示反气旋涡和气旋涡的初始产生位置,与其相连的线表示移动轨迹。图上所标的数字为年份。最后两张为 16 a 间产生的反气旋涡、气旋涡叠加图

从图 1 可看出,在吕宋海峡中部( $120^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ )有多例中尺度涡出现,但中尺度涡在穿越吕宋海峡时由于受挤压等原因会导致移动速度突然加快(可增大到原来的 6~7 倍<sup>[26]</sup>),在卫星高度计资料的时间分辨率为 7 d 的情况下,难以捕捉到所有穿越吕宋海峡的中尺度涡。因此,我们也难以断定图 1 中吕宋海峡中部观测到的中尺度涡是由西北太平洋传进的或是由于吕宋海峡局部的强剪切应力而产生的。这一结果对于另外 3 种判别标准(涡中心水深不小于 1 000 m、高度差不小于 5 cm;涡中心水深不小于 200 m、高度差不小于 7.5 cm;涡中心水深不小于 200 m、高度差不小于 5 cm)同样适用(图未示)。

### 3.2 吕宋海峡中部一个气旋涡的实例分析

由 3.1 节知,中尺度涡在传播至吕宋海峡附近时,相邻两个时间点的移动距离可能超过  $1.5^{\circ}$ 。本节通过分析由卫星高度计得到的 1994 年 8—9 月吕宋海峡附近的中尺度涡活动,说明西北太平洋中尺度涡通过吕宋海峡传进南海的机制是较为复杂的。

图 2a—e 为 1994 年 8 月 10 日至 9 月 7 日吕宋

海峡附近的海面高度距平图。图中同一个涡用相同的字母和序号表示。图 2f 为前 5 张图各涡的轨迹图,红色十号和蓝色○号分别表示反气旋涡和气旋涡的位置,虚线表示其运动轨迹, $\triangle$ 号表示涡的初始产生位置,这些符号旁边的数字表示观测时间。

我们关注吕宋海峡中部的一个气旋涡(即图 2c, d 和 e 中的 C2 涡)从形成到消失的过程。在图 2a, b(即前两周)中,已经可以观察到吕宋海峡中部出现较弱的海面高度负距平信号,且逐渐变强。到 8 月 24 日前后,该负距平信号在来自西北太平洋的较强气旋涡 C1 的影响下发展达到最大,且形成一个相对较弱的气旋涡 C2。之后, C2 涡朝西北方向运动且迅速减弱,见图 2d—e;与此同时 C1 涡也相应衰减,到 9 月 7 日前后分裂为两个小的气旋涡 C1a, C1b。其中,与 C2 涡的形成类似, C1b 涡的形成除来自 C1 涡的影响,也结合了原本就存在于台湾东南部的海面高度负距平信号。由此可见,西北太平洋中尺度涡通过吕宋海峡传入南海的形式是较为复杂的,很可能是通过与吕宋海峡内部原本的海面高度信号进行耦合,再向南海传播<sup>[21-22]</sup>。

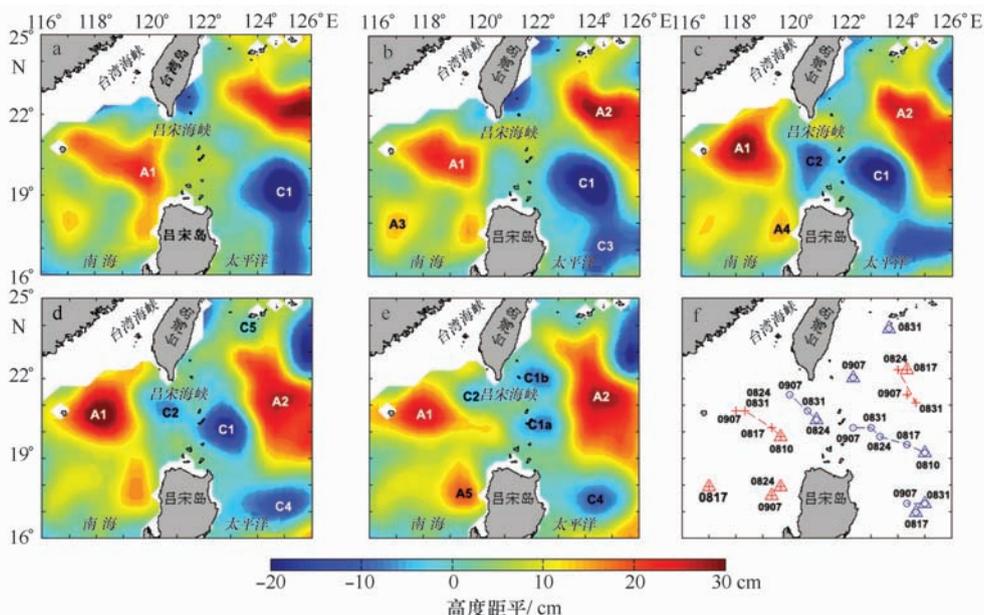


图 2 1994 年 8—9 月吕宋海峡附近海域海面高度距平图

a. 1994-08-10, b. 1994-08-17, c. 1994-08-24, d. 1994-08-31, e. 1994-09-07,

图 a—e 中空白区域为深度浅于 200 m 的区域

### 3.3 西北太平洋不同周期海面高度变化信号在吕宋海峡附近的传播特征

由 3.2 节可知,西北太平洋海面高度变化信号传

至吕宋海峡附近时,会与吕宋海峡内部海面高度变化信号进行耦合,再向南海传播。为研究西北太平洋的中尺度涡或海面高度变化信号传至吕宋海峡附近

时的传播特征,选取  $21^{\circ}\text{N}$  断面做出  $116^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$  范围内海面高度距平的时间-经度图,数据长度从 1993 年 1 月至 2008 年 12 月,如图 3 所示。

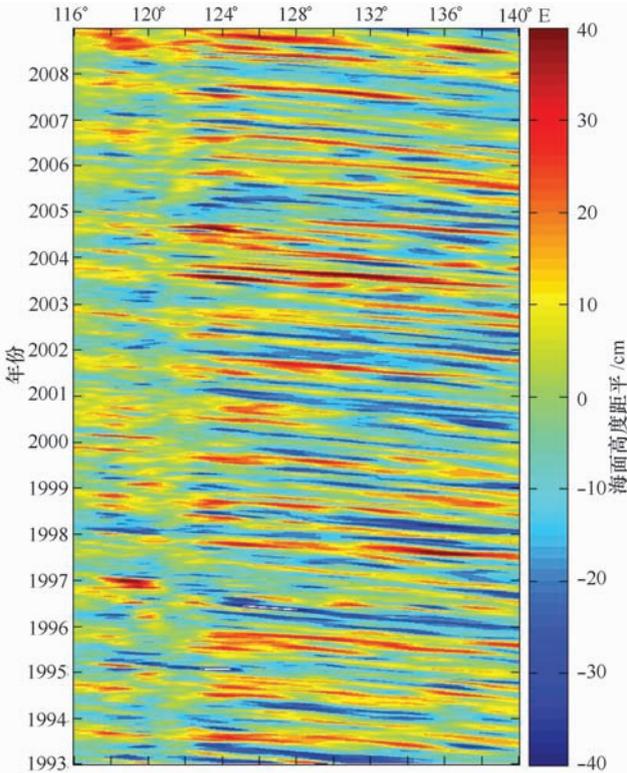


图 3 南海东北部至西北太平洋海面高度距平沿  $21^{\circ}\text{N}$  断面的时间-经度图

从图 3 可看出,西北太平洋上中尺度波动的西传特征很明显,而该特征在  $121^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$  区域内出现了不连续性,由此可以清楚地看出西北太平洋海面高度变化信号在向西传播至吕宋海峡附近时确实受到明显的阻隔。但该阻隔作用并不是彻底的,而且海面高度变化信号(正负距平信号均有)穿过  $121^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$  区域传入南海的比重及位置随时间也有变化。

Hu 等<sup>[23]</sup>曾指出周期为 3~6 个月的海面高度变化信号有时可以通过吕宋海峡传入南海内。受此启发,本文利用巴特沃斯滤波器按周期分别为 1~3 月、3~6 月、330~390 d(年信号)对  $21^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$  断面的海面高度距平数据进行带通滤波(置信度均超过 95%),研究西北太平洋海面高度变化不同周期的信号传入南海的情况(如图 4)。从图 4 可看出,西北太平洋不同周期的海面高度变化信号穿过吕宋海峡传入南海受到的阻隔作用有所不同,且信号向西传播的速度也不同。另外,从图 4a, b 均

可看出,西北太平洋的海面高度变化信号在西传过程中,传播速度有变大的趋势。

由图 4a 可看出,  $21^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$  断面周期为 1~3 个月的海面高度变化信号在吕宋海峡附近并没有受到特别明显的阻隔,只有当海面高度距平较大时才能较清楚地看出来,如 2004 年前后及 2007—2008 年的情况。该周期下,海面高度变化信号在西北太平洋上向西传播的速度约为  $8.5\sim 14\text{ cm/s}$ ,进入南海后西传速度约为  $11\sim 15\text{ cm/s}$ 。

图 4b 表示周期为 3~6 个月的  $21^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$  断面的海面高度变化信号的传播情况,从图中可看出西北太平洋海面高度变化信号向西传播至吕宋海峡附近受到的阻隔作用比图 4a 要更明显。而且,西北太平洋上的信号传播至吕宋海峡附近出现的信号明显“阻断”的位置在不同的时间也有小幅度的摆动,这可能是由于黑潮主轴位置随时间摆动导致的。该周期的海面高度变化信号向西传播速度在西北太平洋上约为  $6.5\sim 13\text{ cm/s}$ ,进入南海后约为  $6\sim 14\text{ cm/s}$ 。另一值得注意的特点是,西北太平洋上的海面高度变化信号传入南海后一般都有不同程度的减弱,但 1997—1998 年南海海面高度变化的信号却似有增强。

图 4c 是主要含年周期(330~390 d)信号的该断面海面高度距平时间-经度图。从图中可看出当单纯包含年变化信号时,由于受大气强迫的作用,西北太平洋和南海的海面高度变化信号的传播速度变得非常快,导致产生近似“共振”的现象。从图中还可看出,由于吕宋海峡或黑潮的作用,南海的海面高度变化信号比西北太平洋滞后约 2 个月左右,这或可解释 3.2 节提到的西北太平洋信号经黑潮耦合后再向南海传播的说法。

此外,西北太平洋和南海的海面高度在周期为 3~6 个月、330~390 d 频段显示出的较大不同除受吕宋海峡和黑潮的影响之外,南海本身在季风强迫下所导致的 SLA 变化也可能是导致该结果的重要原因。

## 4 小结与讨论

本文采用 AVISO 提供的 1993 年 1 月到 2008 年 12 月共 16 a 的融合海面高度距平数据,追踪吕宋海峡附近海域中尺度涡的移动轨迹,并通过分段带通滤波分析西北太平洋海面高度变化信号的传播等问题,得到如下结论:

(1)在数据时间分辨率为 7 d 和本文采用的中尺度涡判别标准前提下,无法确定吕宋海峡中部出现的中尺度涡是由西北太平洋传进的或是由于

吕宋海峡局地的强剪切应力而产生的,也难以清楚地从卫星高度计上观测到中尺度涡穿越吕宋海峡的过程。

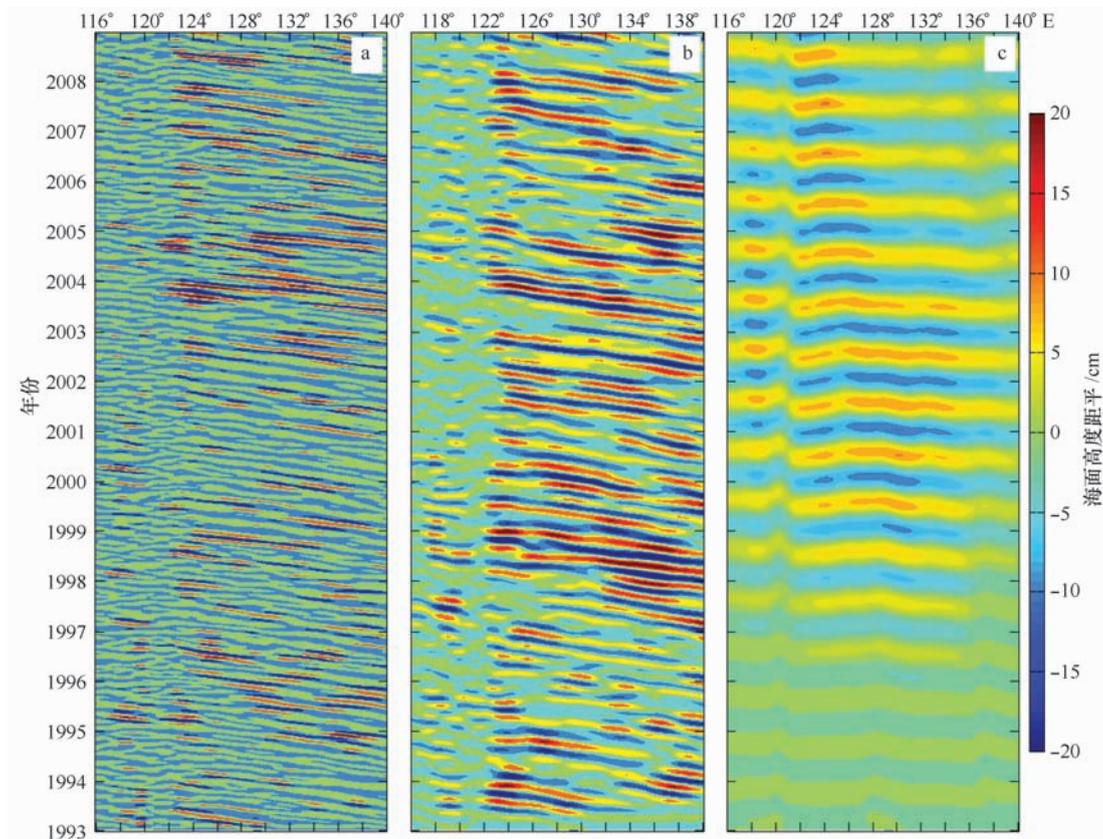


图 4 沿 21°N 分段带通滤波后不同周期海面高度距平数据的时间-经度图

a. 1—3 月, b. 3—6 月, c. 330—390 d

(2)对 1994 年 8—9 月吕宋海峡中部观测到的一个气旋涡的实例分析表明,西北太平洋海面高度变化信号传至吕宋海峡附近,会与吕宋海峡内部原本存在的局地海面高度距平信号进行耦合,再向南海传播。

(3)21°N, 116°~140°E 断面的海面高度距平数据的时间-经度图表明,西北太平洋海面高度变化信号在西传至吕宋海峡附近时(121°~122°E)出现信号不连续,但仍有部分信号可以穿越吕宋海峡传入南海。对该数据进行分段带通滤波表明,西北太平洋不同周期的海面高度变化信号穿过吕宋海峡传入南

海所受阻隔作用、西传速度及强迫机制均有不同。

针对结论(1),随着更高时间分辨率卫星高度计数据的发展,将有利于揭示吕宋海峡附近中尺度涡的穿越过程。当然,西北太平洋上西传的海面高度变化信号,以及这些信号穿过吕宋海峡传进南海,是以涡或者波的形式,这有待进一步的研究与讨论。

**致谢:** AVISO 提供融合高度计资料,匿名审稿专家提出有价值的修改意见,在此一并致谢。郑全安得到美国 NOAA NESDIS ORS 项目 05-01-11-000 部分资助!

## 参考文献:

- [1] NITANI H. Beginning of the Kuroshio[C]//STOMMEL H, YOSHIDA K. Kuroshio, Physical Aspect of the Japan Current. University of Washington, 1972:129—163.

- [2] 伍伯瑜. 台湾海峡环流研究中的若干问题[J]. 台湾海峡, 1982, 1 (1): 1—7.
- [3] 仇德忠, 杨天鸿, 郭忠信. 夏季南海北部一支向西流动的海流[J]. 热带海洋, 1984, 3 (4): 65—73.
- [4] 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套? —南海东北部环流结构探讨[J]. 台湾海峡, 1989, 8 (1): 89—95.
- [5] SHAW P T. The intrusion of the water masses into the sea southwest of Taiwan[J]. J Geophys Res, 1989, 96 (C12): 18213—18226.
- [6] SHAW P T. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine sea water into the South China Sea[J]. J Geophys Res, 1991, 96 (C1): 821—827.
- [7] 冯士筵, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [8] MA H. On the winter circulation of the northern South China Sea and its relation to large oceanic currents[J]. Chin J Oceanol Limnol, 1987, 5 (1): 8—21.
- [9] 王胃, 陈庆生. 南海北部之暖心涡流(一)对南海暖涡之初步观测[J]. 台湾大学海洋学刊, 1987 (18): 92—103.
- [10] LI L, NOWLIN W D, SU J. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea[J]. Deep Sea Res I, 1998, 45: 1469—1482.
- [11] METZGER E J, HURLBURT H E. Coupled dynamics of South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean[J]. J Geophys Res, 1996, 111: 12331—12352.
- [12] METZGER E J, HURLBURT H E. The nondeterministic nature of Kuroshio penetration and eddy shedding in the South China Sea[J]. J Phys Oceanogr, 2001, 31: 1712—1732.
- [13] YANG H, LIU Q, LIU Z, et al. A general circulation model study of the dynamics of the upper ocean circulation of the South China Sea [J]. J Geophys Res, 2002, 107 (C7): 3085, doi: 10.1029/2001JC001084.
- [14] XUE H, CHAI F, PETTIGREW N, et al. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea[J]. J Geophys Res, 2004, 109, C02017, doi:10.1029/2002JC001724.
- [15] HSUEH Y, ZHONG L. A pressure-driven South China Sea Warm Current[J]. J Geophys Res, 2004, 109, C09014, doi:10.1029/2004JC002374.
- [16] 刘秦玉, 刘倬腾, 郑世培, 等. 黑潮在吕宋海峡的形变及动力机制[J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26 (4): 413—420.
- [17] 李薇, 刘秦玉. 西边界流在边界“豁口”的形变及其机制[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27 (3): 277—281.
- [18] 李薇, 刘秦玉, 杨海军. 吕宋海峡海洋环流的基本特征[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28 (3): 345—352.
- [19] 李燕初, 李立, 林明森, 等. 用 Topex/Poseidon 高度计识别台湾西南海域中尺度强涡[J]. 海洋学报, 2002, 24 (supp. 1): 163—170.
- [20] 李燕初, 李立, 靖春生, 等. 南海东北部海域海面高度的时空变化特征[J]. 科学通报, 2004, 49(7): 702—709.
- [21] 郭景松, 袁业立, 熊学军, 等. 吕宋海峡两侧中尺度涡统计[J]. 海洋科学进展, 2007, 25 (2): 139—147.
- [22] 靖春生, 李立, 朱大勇. 西北太平洋—南海中尺度水位波动的耦合传播特征[J]. 科学通报, 2006, 51 (20): 2 422—2 428.
- [23] HU J, KAWAMURA H, HONG H, et al. 3~6 month variation of sea surface height in the South China Sea and its adjacent ocean[J]. J Oceanogr, 2001, 57: 69—78.
- [24] YUAN D, HAN W, HU D. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data[J]. J Geophys Res, 2006, 111, C11007, doi:10.1029/2005JC003412.
- [25] SHEU W-J, WU C-R, OEY L-Y. Blocking and westward passage of eddies in the Luzon Strait[J]. Deep-Sea Res II, 2010, doi:10.1016/j.dsr2.2010.04.004.
- [26] ZHENG Q, TAI C-K, HU J, et al. Satellite altimeter observations of nonlinear Rossby eddy-Kuroshio interaction at the Luzon Strait [J]. J Oceanogr, 2011, 67(4), doi: 10.1007/s10872-011-0035-2.
- [27] WANG G, SU J, CHU P. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30 (21): 2121.

## Statistical analysis of the features of meso-scale eddies near the Luzon Strait

LIN Hongyang<sup>1</sup>, HU Jianyu<sup>1,2</sup>, ZHENG Quan'an<sup>2,3</sup>

(1. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environment Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland, USA)

**Abstract:** 16 years (1993—2008) of merged sea level anomaly (MSLA) data obtained from Archiving, Val-

Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO) are used to track the trajectories of meso-scale eddies near the Luzon Strait (LS) ( $18^{\circ}-23^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}-126^{\circ}\text{E}$ ), and the results indicate that it is difficult to observe meso-scale eddies from the northwestern Pacific propagating into the South China Sea (SCS) through the LS based on the data with the temporal resolution of 7 d. The analysis on one cyclonic eddy observed in the middle of the LS in 1994, suggests that the sea level anomaly from the Northwestern Pacific propagates into the SCS through the LS after coupling with the original signal in the LS. The time-longitude diagram implies that the sea level anomaly signals become discontinuous near the LS ( $121^{\circ}-122^{\circ}\text{E}$ ) when they propagate westward. After applying the band-pass filter to the sea level anomaly data in the section  $21^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}-140^{\circ}\text{E}$  with the periods of 1–3 month, 3–6 month and 330–390 d, one can conclude that the signals from the Northwestern Pacific propagating into the SCS through the LS get different blocked, have different westward propagation velocity and have different forcing mechanisms for different period bands.

**Key words:** Luzon Strait; meso-scale eddies; satellite altimeter data