

卫星高度计资料揭示的冬季南海吕宋冷涡的双涡结构*

孙成学, 刘秦玉

中国海洋大学, 物理海洋实验室, 海洋-大气相互作用与气候实验室, 山东 青岛 266100

摘要: 吕宋冷涡是南海海洋环流系中最重要的涡旋之一。利用卫星高度计资料时空较高分辨率的优势, 发现冬季吕宋冷涡有可能是由 2 个气旋式涡旋所组成的, 一个气旋式涡旋位于吕宋岛的西侧(LCE1), 另一个位于吕宋岛的西北(LCE2)。利用相关分析、功率谱分析等, 估计了局地风应力和黑潮在形成吕宋冷涡过程中各自的贡献。研究表明, LCE1 只存在于冬季, 与吕宋岛西侧局地的风应力旋度有关; LCE2 位于进入吕宋海峡的黑潮的西侧, 全年存在, 可能是由黑潮所诱生的气旋式涡旋, 其变化主要周期为季节内振荡。

关键词: 吕宋冷涡; 南海; 风应力; 黑潮

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)03-0009-07

Double eddy structure of the winter Luzon Cold Eddy based on satellite altimeter data

SUN Cheng-xue, LIU Qin-yu

Physical Oceanography Lab., Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Lab., Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The Luzon Cold Eddy is one of the most important eddies in the South China Sea. Using the high-resolution satellite altimeter data, the authors found that the Luzon Cold eddy may be consisted of two cyclonic eddies: one is located to the west of the Luzon Island (LCE1) and the other is to the northwest of the Luzon Island (LCE2). Using the correlation analysis and power spectrum analysis, the relative contributions of wind stress and the Kuroshio are estimated respectively. It is shown that LCE1 only appears in winter and has a close relation with the local wind stress curl west of the Luzon Island; LCE2 shows intraseasonal variation and appears on the west side of the Kuroshio in the Luzon strait during the whole year and therefore could be caused by the Kuroshio.

Key words: Luzon Cold Eddy; South China Sea; wind stress; Kuroshio

吕宋冷涡作为南海两大季节尺度的涡旋之一, 它的存在性早已被多次的观测事实所证明。例如 1990 年 12 月 16—30 日台湾“海研一”号调查船在吕宋海峡及吕宋岛以西海域 4 个断面的 CTD 走航观测发现, 在吕宋岛西侧有一个上升流区, 这一主上升流区位于 16° — 19° N, 距离吕宋岛西侧约有 100km, 在 300m 处, 上升流似乎仍然存在^[1]。1992 年 3 月 8—27 日中国科学院南海海洋研究所“实验 3”号与台湾大学“海研一”号在南海东北部海区的协同调查以

及 1961—1980 年南海北部海区的 XBT 资料也同样发现吕宋岛西侧这一低温上升流区^[2]。杨海军等^[3]通过分析气候态温度资料, 也同样证实冬季在吕宋岛的西侧存在着一个尺度大约为 4—5 个纬距的温跃层上凸的现象。

有关吕宋冷涡的形成机制前人也有各种观点。借助约化重力模式的研究结果表明, 定常的黑潮入流在吕宋海峡不易出现显著的环状流动结构, 但在海峡西侧会诱生一个气旋涡, 该涡旋达到一定强度

收稿日期: 2009-11-17; 修订日期: 2010-07-07。孙淑杰编辑

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411803、2010CB428904)

作者简介: 孙成学(1982—), 男, 山东省临朐县人, 工程师, 博士, 现工作于海军海洋水文气象中心, 主要从事海气相互作用及大气波导方面的研究。

通信作者: 刘秦玉。E-mail: liuqy@ouc.edu.cn

*感谢夏威夷大学 Maximenko 博士给我们提供的平均海平面高度资料!感谢审稿专家提出的宝贵建议!

时, 因子和侧边界作用使其向西南移动^[4]。利用 POM 海洋模式的数值实验表明, 风强迫是吕宋冷涡生成的主要机制, 而黑潮对吕宋冷涡的影响是第二位的^[5]。在研究黑潮入侵吕宋海峡并以涡旋脱落的形式影响南海时, 也发现了黑潮西南端的气旋式扰动迅速增加, 进而由于锋面不稳定而形成一个气旋涡, 这一气旋式的涡旋也会移动到吕宋冷涡所在的海区^[6]。对卫星资料的研究表明, 1993 年 1 月—2002 年 7 月间冬季气旋涡和反气旋涡生成的相对集中的地带与局地的正负风应力旋度有着密切的联系^[7]。前人研究指出了海面风场和进入吕宋海峡的黑潮都可能对吕宋冷涡的形成有贡献, 那么, 海面风场和吕宋海峡的黑潮在吕宋冷涡的形成中都各起什么作用, 这是本文要解决的主要问题。由于使用了高时空分辨率的卫星资料, 得到了传统上的吕宋冷涡实际上是由 2 个形成机制完全不同的气旋式涡旋所组成的新认识。本文的第 1 节将介绍文中所用到的资料; 第 2 节对吕宋冷涡的空间分布形态进行了分析; 第 3 节再对吕宋海域涡旋的生成机制进行探讨; 最后一节是结论。

1 资料及分析方法

法国 Archiving Validation and Interpolation of Satellite Oceanographic Data (AVISO) 计划提供了整合了 TOPEX/Poseidon、Jason1 以及 ERS (the European Research Satellite altimeter) 数据的产品。该产品经过了潮汐、逆压差以及电磁偏向等多种校正^[8]。该产品在空间上采用 MERCATOR 网格, 空间分辨率为 $(1/3)^\circ$, 时间分辨率为 7d。本文中所选取的卫星高度计资料时间段为 1992 年到 2007 年。由于 T/P 卫星高度计观测的只是长期平均海平面高度的偏差, 为了得到实际的海平面高度场, 本文用了夏威夷大学提供的平均海平面高度资料(空间的分辨率为 0.5°)。该资料是基于卫星得到的大尺度平均海平面以及由浮标、卫星高度计、风资料经动量平衡得到的海平面 2 种资料联合计算的结果^[9]。本文还用到了 QuikSCAT 逐周的海面风场资料^[10], 其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间长度段为 1999 年至 2007 年。

为了更准确地确定海洋涡旋, 我们使用了 Okubo-Weiss 函数^[11-12], 该函数为

$$q = \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 - \omega^2;$$

其中 u 和 v 分别是流的两个水平分量; ω 是涡量, 也就是海洋中的相对涡度; ω^2 为涡度拟能。

Okubo-Weiss 函数 $q > 0$, 流场以变形为主; 而当 $q < 0$ 时, 流场则是以旋转为主。而在实际应用中取一正的参数 q_0 , 将流区分为 3 类。 $q > q_0$ 的区域, 流以变形为主; $q < -q_0$ 的区域, 流以旋转为主; 而 $-q_0 < q < q_0$ 的区域则为背景场区。以往的研究中通常把 q_0 取为 $0.2 \delta q$, δq 为全区 q 的标准差, 用以上标准能够较为准确地将涡旋从复杂的流场中分离出来^[13-15]。

2 冬季吕宋西北海域气旋式涡旋的形态结构

前人的研究结果表明, 吕宋冷涡只存在于冬半年^[3, 16]。图 1 给出了吕宋岛西北海域冬季(12 月—次年 1 月)平均的海平面高度场分布图, 它来自于 T/P 海平面异常场与气候平均海平面场的叠加。从图中可以看到, 冬季在吕宋岛的西侧存在着一个大范围的海平面高度低值区, 其水平范围约有 4—5 个纬距, 中心位置约在 $117^\circ 30' E$ 、 $17^\circ 30' N$, 中心处的海平面高度值约为 40 cm, 该值比周围同纬度的海平面高度要低 30 cm 左右。此海平面高度低值区向北延伸到约 $20^\circ N$, 向南约到 $16^\circ N$, 水平尺度达到 4—5 个纬距, 这与 Yang 等^[5]的研究结果相一致。因此, 冬季平均的吕宋冷涡表现为一个水平尺度达到 4—5 个纬距的气旋式涡旋。

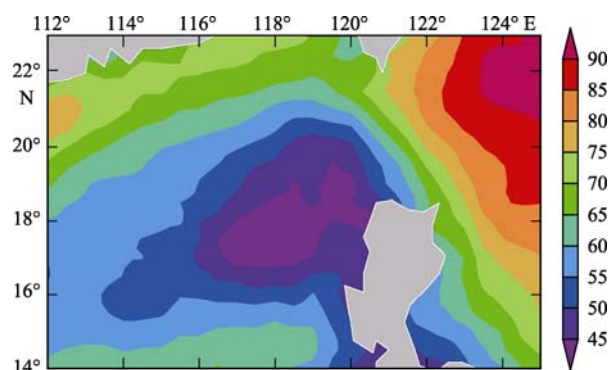


图 1 1999—2007 年冬季海平面高度场(单位: cm)的平均分布图

Fig. 1 Pattern of winter-mean sea surface height (units: cm) during 1999–2007

为了进一步刻画该涡旋的水平结构, 本文选取了 1999—2007 年的冬季逐周的周平均海平面高度场和对应的地转流进行了分析, 结果表明吕宋岛西北侧气旋式涡旋的分布主要有以下 2 种形态: 在吕宋岛西北海域存在着 2 个气旋式的涡旋(形态一); 在吕宋岛西北海域存在一个气旋式涡旋(形态二)。图 2a 和图 2b 分别给出了这 2 种形态的个例。图 2a 为 2005 年 2 月 23 日(该日期为周平均的第 4 天)吕宋岛西北海域海平面高度及地转流场。从图中可以

看到, 在 2005 年 2 月 23 日, 有 2 个气旋式涡旋分别位于吕宋岛的西侧和西北侧, 2 个气旋式涡旋的强度大小相差不大, 另外这 2 个气旋式涡旋分别对应着 2 个 q/q_0 值小于 -1 的中心(如图 3); 其他“形态一”出现的时刻也有类似现象。图 2b 所示为 2003 年 1 月 29 日(该日期为周平均的第 4 天)吕宋岛西北海域海平面高度及地转流场的分布图。从图中可以看到, 在吕宋岛西北海域仅存在 1 个气旋式涡旋, 其形态

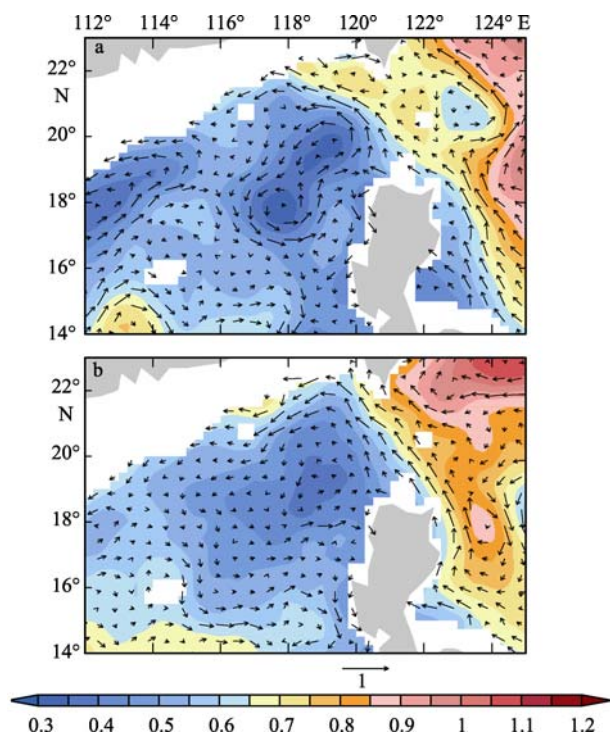


图 2 海平面高度场(色块, 单位: m)及地转流场(矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)分布图

a. 2005 年 2 月 23 日; b. 2003 年 1 月 29 日

Fig. 2 Pattern of the SSH (color; units: m) and geostrophic current (vector; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on 23 Feb 2005 (a) and 29 Jan 2003 (b)

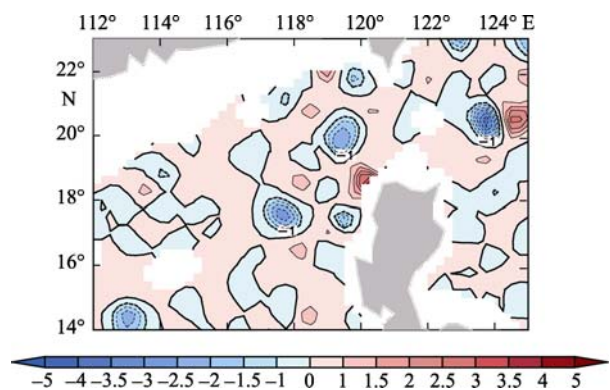


图 3 2005 年 2 月 23 日依据海平面高度计算的 q/q_0 值分布图

Fig. 3 Pattern of q/q_0 on 23 Feb 2005 based on the SSH data

结构与气候平均态(图 1)的情况很相像; 这是一个“形态二”出现的个例。

依据 1999—2007 年冬季共 120 个周平均的样本(样本选取见表 1), 我们得到冬季平均地转涡度分布图(图 4), 可以看到冬季在吕宋岛的周围存着 2 个较大范围的正涡度区域。一个位于吕宋岛的西侧, 其中心位置位于 117°E 、 $17^\circ30'\text{N}$, 其范围大致为在 $116^\circ\text{—}119^\circ30'\text{E}$ 、 $16^\circ\text{—}18^\circ30'\text{N}$ (称其为 LCE1)。它与海平面高度的低值中心位置较为一致。而另一个正的涡度区域则位于吕宋岛的西北侧, 大致范围为 $118^\circ30'\text{—}120^\circ30'\text{E}$ 、 $18^\circ45'\text{—}20^\circ45'\text{N}$ (称其为 LCE2)。通过个例分析发现, LCE1 和 LCE2 两个气旋式涡旋有时候会靠在一起, 形式上表现为一个大的气旋式环流, 但是大部分时间(约占样本总数的 73%)都有其各自的中心, 表现为独立的涡旋结构。

表 1 1999—2007 冬季周平均资料的时间段

Tab. 1 Periods of winter data (weekly averaged) during 1999—2007

年份	取样起始时间	取样终止时间
1999—2000	1999-11-24	2000-03-01
2000—2001	2000-11-29	2000-03-07
2001—2002	2001-11-28	2002-03-06
2002—2003	2002-11-27	2003-03-05
2003—2004	2003-11-26	2004-03-03
2004—2005	2004-11-24	2005-03-02
2005—2006	2005-11-30	2006-03-08
2006—2007	2006-11-29	2007-03-07

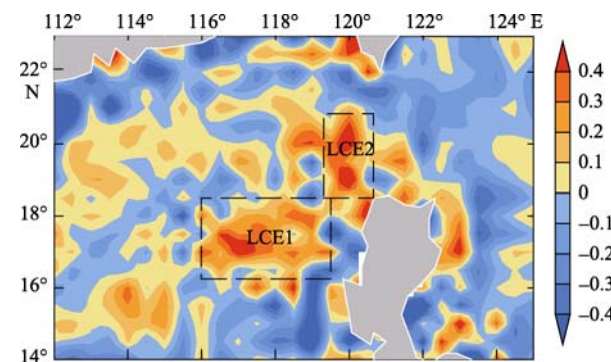


图 4 由 1999—2007 年逐周海平面高度资料得到的冬季(12—2 月)区域平均的地转涡度分布图(单位: 10^{-5}s^{-1})

由下到上 2 个黑虚线框所示分别为 LCE1 区和 LCE2 区

Fig. 4 Regional-mean vorticity of geostrophic flow (units: 10^{-5}s^{-1}) in winter (December–January) during 1999–2007. The two boxes indicate the areas of LCE1 and LCE2

在气候平均意义下, 这 2 个气旋式地转涡度强度几乎一样($0.4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), 但是它们有着各自独立的涡旋中心(图 4)。为了确定 LCE2 的存在性, 我们用 1999—2007 年冬季整合的海面高度异常和 2002

—2007 年冬季海面高度异常直接计算地转流的涡度, 都在 $118^{\circ}30'—120^{\circ}30'E$ 、 $18^{\circ}45'—20^{\circ}45'N$ 海域得到独立于 $116^{\circ}—119^{\circ}30'E$ 、 $16^{\circ}—18^{\circ}30'N$ 海域的另一个正地转涡度局地最大值, 虽然该最大值出现的位置与图 4 不完全相同(图略)。由于平均海平面的加入, 在 $118^{\circ}30'—120^{\circ}30'E$ 、 $18^{\circ}45'—20^{\circ}45'N$ 海域因流速(黑潮)的强水平切变的涡度约为 $0.15 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。因此, LCE1 和 LCE2 这 2 个气旋式涡旋有时合并, 有时分离, 冬季 LCE1 的强度约为 LCE2 的 2 倍。

从上面的分析我们发现, 传统的吕宋冷涡实际上是由 2 个独立的气旋式涡旋所组成的, 一个位于吕宋岛的西侧(LCE1), 另一个则位于吕宋岛的西北侧(LCE2)。2 个气旋式涡旋各自的成因是什么, 我们将在下面讨论。

3 吕宋西北海域气旋式涡旋生成机制

前人关于吕宋冷涡的研究表明, 吕宋冷涡最大的 2 个影响因子为局地风应力和黑潮, 当然至于风应力和黑潮两者之间谁是主导因子还存在着一定的争议。在这里, 我们就分别对 LCE1 和 LCE2 与黑潮和风应力的关系予以研究。

冬季风在通过吕宋岛高于 500m 的高山后, 在岛的西南侧形成了一对正负旋度对, 风的正旋度中心位于 $119^{\circ}E$ 、 $17^{\circ}30'N$, 在 LCE1 的正东侧(图 5), 可以推测 LCE1 的形成是与该风的正旋度中心有关; 另一方面, 黑潮在流经吕宋海峡时会诱生气旋式涡旋, 而 LCE2 的位置正在进入吕宋海峡黑潮的西侧^[17], 可以推测 LCE2 的形成与进入吕宋海峡的黑潮有关。

为了证明以上的猜测, 我们选取从 1999 年到 2006 年冬季 LCE1 区和 LCE2 区的平均地转涡度分别作为 LCE1 和 LCE2 的指数。从 1999 年到 2006 年, 每一年的冬季都取 11 月末到 3 月初时间段内 15 个样本, 得到代表 LCE1 强度指数(总样本为 120)的标准化的时间序列; 同样, 可以依据吕宋西北角海域($118^{\circ}30'—120^{\circ}30'E$, $17^{\circ}—19^{\circ}N$)的风应力旋度得到一个标准化风应力旋度的时间序列(为了去掉风场中的准 2 周振荡, 风应力旋度的时间序列经过了 3 点平滑处理)和穿越断面 $120^{\circ}37'30"—122^{\circ}7'30'E$ 、 $20^{\circ}7'30"N$ 的地转流流量(代表入侵吕宋海峡的黑潮流量)的时间序列。图 6a 为 LCE1 强度指数(横轴)与风应力旋度指数(纵轴)的离散相关序列。从离散点的分布来看, LCE1 区平均地转涡度的变化与风应力旋度的变化比较一致, 有较好的正相关, 计算得

到的两者的相关系数为 0.46。大部分时刻, 当风应力旋度为正异常时, 对应着 LCE1 区正的地转涡度异常(气旋式涡度加强); 而当风应力旋度为负异常时, LCE1 区则对应着负的地转涡度异常(气旋式涡度减弱)。而从 LCE1 强度指数(横轴)与黑潮流量强度指数(纵轴)的离散图(图 6b)中, 两者的相关性不明显, 经计算得两者的相关系数仅为 -0.12, 达不到 90% 的信度检验。由上面的分析可得, LCE1 的生成与风应力旋度的关系密切。

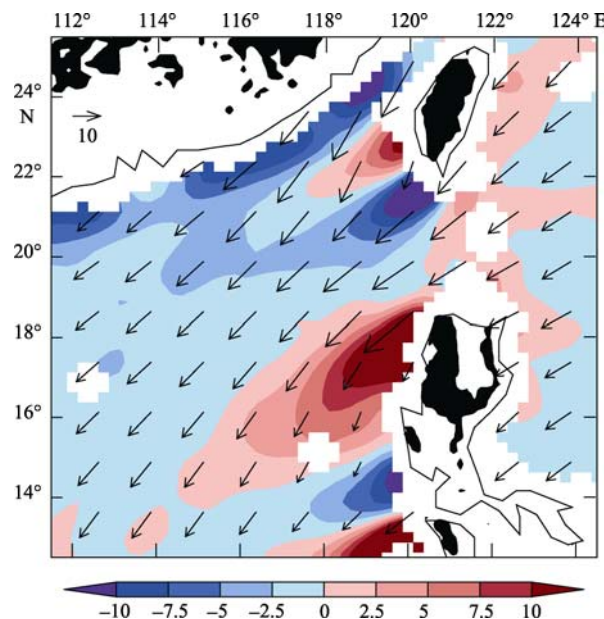


图 5 由 1999—2007 年 QSCAT 资料得到的冬季(12—2 月)平均的海面风(矢量, 单位: $m \cdot s^{-1}$)和风应力旋度引起的 Ekman 抽吸速度(色块, 向上为正, 单位: $10^{-6} m \cdot s^{-1}$)

图中陆域上的黑色斑块表示地表高度大于 500m 的区域

Fig. 5 Winter sea surface wind (vector; units: $m \cdot s^{-1}$) and Ekman pumping (colour; units: $10^{-6} m \cdot s^{-1}$) based on the QSCAT data during 1999–2007. Land topography with elevations greater than 500 m is shaded in black

LCE2 指数(实线)与入侵吕宋海峡的黑潮流量(虚线)2 个标准化时间序列如图 7 所示。从图 7 中可以看到 2 个时间序列呈显著正相关, 正的黑潮流量异常(即黑潮偏强)对应着 LCE2 区正的地转涡度异常, 而黑潮流量为负异常(即黑潮偏弱)时, 则对应着 LCE2 区负的地转涡度异常。两时间序列的相关系数达到 0.4, 大于 99% 的信度检验值, 这也验证了 LCE2 涡旋的生成与黑潮有着密切的联系。为了更好地说明 LCE2 与风场及黑潮的关系, 我们同样分别给出了 LCE2 强度指数与 LCE2 区平均风应力旋度指数的散点图(图 8a)、LCE2 强度指数与黑潮流量强度指数的散点图(图 8b)。比较图 8 中的 a、b 两图, 我们不难发现, LCE2 强度与黑潮流量强度有着更好的

相关性, 而与风场的相关性则比较低, 相关系数仅为 0.07。

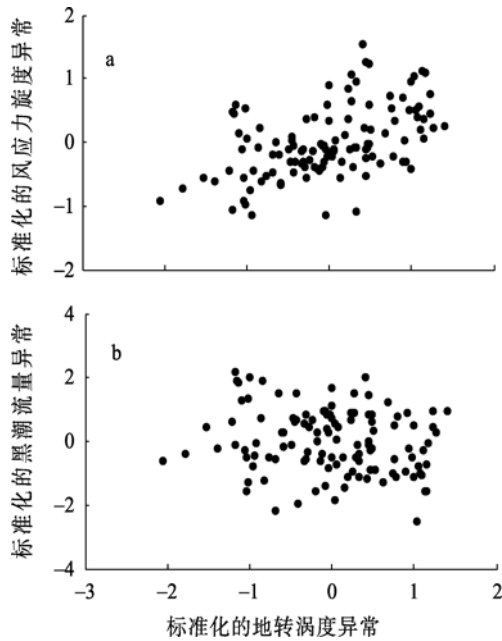


图 6 1999—2007 冬季时段 LCE1 区标准化的地转涡度异常与风应力旋度异常(a)和标准化的黑潮流量异常(b)的散点图

a. 标准化的 LCE1 区的地转涡度异常与区域 $118^{\circ}30'—120^{\circ}30'E$ 、 $17^{\circ}—19^{\circ}N$ 的风应力旋度异常散点图。b. 标准化的 LCE1 区的地转涡度异常与穿越断面 $120^{\circ}37'30''—122^{\circ}7'30''E$ 、 $20^{\circ}7'30''N$ 的黑潮流量异常的散点图。所有时间序列均由 1999—2007 冬季时段的 120 个样本组成

Fig. 6 Scatter diagrams of the normalized geostrophic vorticity anomaly in LCE1 vs normalized wind stress curl anomaly in the area of $118^{\circ}30'—120^{\circ}30'E$, $17^{\circ}—19^{\circ}N$ (a), and vs. the Kuroshio transport anomaly across the line at $120^{\circ}37'30''—122^{\circ}7'30''E$, $20^{\circ}7'30''N$ (b). Each time series consists of 120 samples in winter during the period 1999–2007

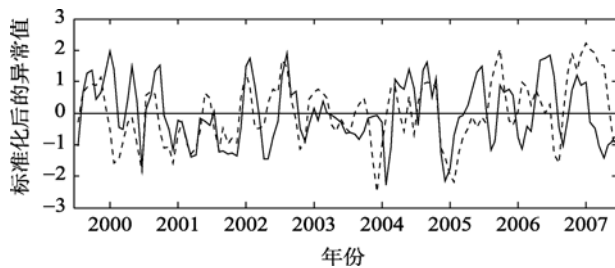


图 7 标准化后的 LCE2 区 1999—2007 冬季时段 120 个周平均样本的地转涡度异常(实线)与穿越断面 $120^{\circ}37'30''—122^{\circ}7'30''E$ 、 $20^{\circ}7'30''N$ 的黑潮流量异常(虚线)的时间序列图

Fig. 7 Time series of the normalized geostrophic vorticity anomaly in LCE2 (solid line) and of the normalized Kuroshio transport anomaly across the line at $120^{\circ}37'30''—122^{\circ}7'30''E$, $20^{\circ}7'30''N$ (dashed line) in winter during the period 1999–2007 (120 samples)

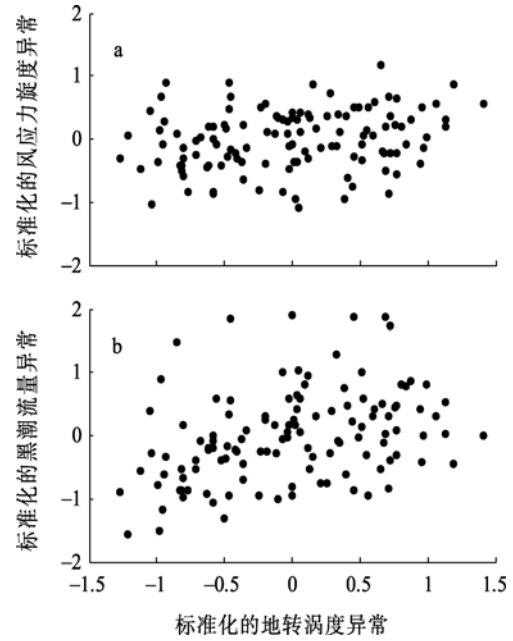


图 8 1999—2007 冬季时段 LCE2 区标准化的地转涡度异常与局地风应力旋度异常(a)和黑潮流量异常(b)的散点图
a. 标准化的 LCE2 区的地转涡度异常与相应区域风应力旋度异常散点图; b. 标准化的 LCE2 区的地转涡度异常与穿越断面 $120^{\circ}37'30''—122^{\circ}7'30''E$ 、 $20^{\circ}7'30''N$ 的黑潮流量异常的散点图。所有时间序列均由 1999—2007 冬季时段的 120 个样本组成

Fig. 8 Scatter diagrams of the normalized geostrophic vorticity anomaly in LCE2 vs. normalized local wind stress curl anomaly (a) and vs. the normalized Kuroshio transport anomaly across the line at $120^{\circ}37'30''—122^{\circ}7'30''E$, $20^{\circ}7'30''N$ (b). Each time series consists of 120 samples in winter during the period 1999–2007

LCE1 与 LCE2 两个涡旋的存在时段有所不同。LCE2 不仅在冬半年存在, 在夏半年它也同样存在, 也就是说我们要看 LCE2 的变化, 可以不局限于冬季。因此, 我们取 1992 年 10 月—2007 年 4 月的逐周资料进行分析, 其总时间序列达到 758 个样本。时间序列的选取方法同上, 其结果如图 9 所示。虚线表示的物理量为逐周的穿越断面 $120^{\circ}37'30''—122^{\circ}7'30''E$ 、 $20^{\circ}7'30''N$ 的地转流流量, 实线则显示的是 LCE2 平均地转涡度的逐周变化, 2 个时间序列都经过标准化处理。总的看来, 2 个时间序列仍有着较好的正相关性, 其相关系数达到 0.34。我们再用另外的因子来表征入侵吕宋海峡的黑潮与 LCE2, 来证实它们之间的相关性。黑潮的强度用吕宋海峡处黑潮主轴的最大流速来表征, 而选择 LCE2 区的最大涡度来表征 LCE2 的强度, 两者离散点图如图 10 所示, 其中横轴为黑潮主轴的最大流速, 纵轴为 LCE2 区的最大涡度。图 10a 所示为冬季时段, 图 10b 则反映的是除冬季外的其他时段。尽管图 a 和图 b 的样本数相差较大, 但总的来看, 冬季与其他时段

散点的分布状态较为类似,即黑潮最大流速与 LCE2 区的最大地转涡度都有着较好的正相关性。因

此,黑潮与 LCE2 的显著相关性并不单单存在于冬季时段,其他时段同样存在,并且季节变化不显著。

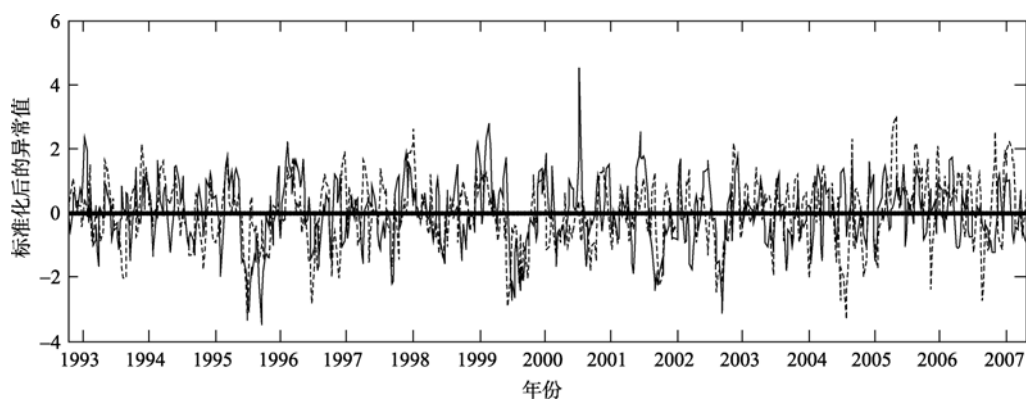


图 9 LCE2 区 1992—2007 年间共 758 个周平均样本的区域平均地转涡度异常(实线)与穿越断面 $120^{\circ}37'30''$ — $122^{\circ}7'30''$ E、 $20^{\circ}7'30''$ N 的黑潮流量(虚线)的标准化时间序列图

Fig. 9 Time series of the normalized geostrophic vorticity anomaly in LCE2 area (solid line) and of the normalized Kuroshio transport anomaly across the line at $120^{\circ}37'30''$ — $122^{\circ}7'30''$ E, $20^{\circ}7'30''$ N (dashed line) during 1992–2007 (758 samples)

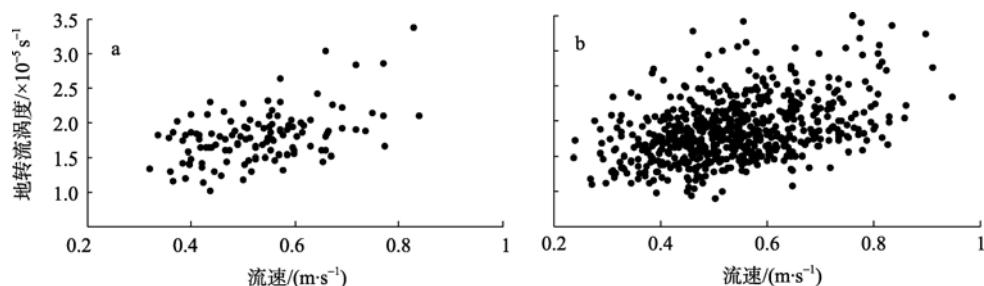


图 10 LCE2 区的最大地转涡度与相应的穿越断面 $120^{\circ}37'30''$ — $122^{\circ}7'30''$ E、 $20^{\circ}7'30''$ N 的黑潮的最大流速值的散点图

a. 1992—2007 年的冬季时段; b. 1992—2007 年的其他时段

Fig. 10 Maximum geostrophic vorticity (s^{-1}) and corresponding maximum Kuroshio velocity (units: $m \cdot s^{-1}$) across the line at $120^{\circ}37'30''$ — $122^{\circ}7'30''$ E, $20^{\circ}7'30''$ N in winter (a) and in other seasons (b) during 1992–2007

下面我们分别对黑潮流量和 LCE2 平均涡度 2 个时间序列进行功率谱分析以得到其主要变化周期。图 11a、b 分别为该黑潮流量时间序列的功率谱分析图,图中实线为谱密度线,虚线为 99% 的信度检验线。从该功率谱谱密度的分布可以看出,黑潮流量超过信度的变化周期主要有 2 个,分别为 60—70d 和 100d。其他周期的谱值(包括 365d,图中没有给出)均不过信度。该结果与浮标定点观测的结果^[17]类似,再一次证实了进入海峡的黑潮流量季节内变化超过年周期变化。该现象是与吕宋海峡同纬度的大洋内区西传的自由 Rossby 波以及它的稳定性有关^[18]。从 LCE2 区平均地转涡度的功率谱谱密度的分布可以看出,黑潮的流量的功率谱谱密度的分布和 LCE2 区平均地转涡度时间序列的功率谱谱密度的分布极为相似,只是 LCE2 区平均地转涡度在周期为 100d 的谱值没有通过信度检验。

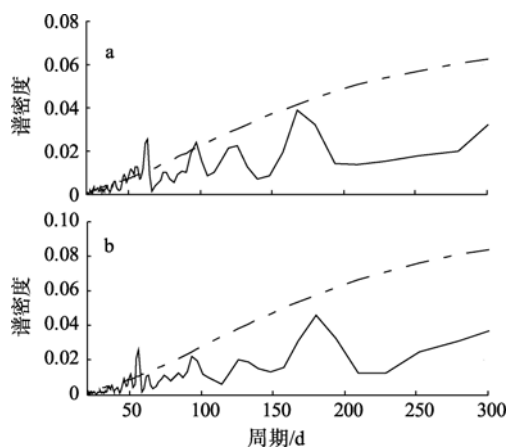


图 11 黑潮流量异常时间序列(图 9 中的虚线)的功率谱图(a)与 LCE2 区平均地转涡度时间序列(图 9 中的实线)的功率谱图(b)

Fig. 11 Power spectra of two time series: Kuroshio transport (dashed line in Fig. 9) (a), and mean geostrophic vorticity in LCE2 (solid line in Fig. 9) (b)

4 结论

通过对高分辨率的卫星观测资料的分析, 发现传统的吕宋冷涡在大部分时间内可能是由 2 个气旋式涡旋组成: 一个气旋式涡旋位于吕宋岛的西侧 (LCE1), 另一个气旋式涡旋位于吕宋岛的西北侧 (LCE2); 但前者的空间尺度大约是后者的 2 倍。

LCE1 和 LCE2 的存在时段不同。LCE1 只存在于冬季, 其中心与冬季平均的海平面高度场的中心较为一致; 而 LCE2 则四季存在。在冬季, LCE1 和 LCE2 两个气旋式涡旋共同组成了传统的吕宋冷涡。到了夏季, LCE2 依然存在, 而 LCE1 则不复存在。

通过个例分析发现, LCE1 和 LCE2 两个气旋式涡旋有时候会靠在一起, 形式上表现为一个大的气旋式环流, 有时表现为各自独立的涡旋结构。

借助 Okubo-Weiss 函数分析了 LCE1 区和 LCE2 区的流场特性。分析结果表明, LCE1 区和 LCE2 区的流场均主要以气旋式涡旋形式存在, 进一步证明了 2 个气旋式涡旋的存在性。依据加上平均海平面

资料后计算的地转涡度, LCE2 区的旋涡特性要强于 LCE1 区, 但由于黑潮西侧流的水平切变较大, 在 LCE2 海域地转涡度不能完全代表涡旋的强度。1999—2007 年平均而言, LCE1 的地转涡度大约是 LCE2 地转涡度的 2 倍。

LCE1 的强度变化主要受吕宋岛西北角的风应力旋度强弱变化的影响, 而 LCE2 其强度变化主要受到黑潮流量的影响。冬季 LCE1 和 LCE2 虽然分别作为传统吕宋冷涡的组成部分, 但是冬季期间 2 个涡旋的强度变化的相关性却很差, 这更说明了把传统吕宋冷涡进行细分的必要性, 同时也解决了前人关于吕宋冷涡生成机制中存在的分歧。

尽管卫星高度计资料基本上解决了研究海洋涡旋资料的时空分辨率问题, 但由于仅用卫星观测的海面高度资料无法准确地刻画涡旋形成的整个过程等问题的存在, 本文的结论在定量描述方面存在一定的问题, 有关机制研究还需要用数值试验进一步证实。今后还需要用更准确的资料, 特别是海洋次表层的现场观测资料来对吕宋冷涡开展进一步的深入研究。

参考文献

- [1] SHAW P T, LIU K K, PAI S C, et al. Winter upwelling off Luzon in the northeast South China Sea[J]. *Geophys Res*, 1996, 101: 16435–16448.
- [2] 何有海, 关翠华. 南海上层海洋热含量的年际和年代际变化[J]. *热带海洋*, 1997, 16(1): 23–29.
- [3] 杨海军, 刘秦玉. 南海上层水温分布的季节特征[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(5): 501–507.
- [4] 刘先炳, 苏纪兰. 南海环流的一个约化模式[J]. *海洋与湖沼*, 1992, 23(2): 167–174.
- [5] YANG HAIJUN, LIU QINYU. Forced Rossby wave in the northern South China Sea[J]. *Deep-Sea Res*, 2003, 50: 917–926.
- [6] JIA YINGLAI, LIU QINYU, LIU WEI. Primary study of the mechanism of eddy shedding from the Kuroshio bend in Luzon strait[J]. *J Oceanogr*, 2005, 61: 1017–1027.
- [7] WANG GUIHUA, CHEN DAKE, SU JILAN. Winter eddy genesis in the eastern South China Sea due to orographic wind-jets[J]. *J Phys Oceanogr*, 2008, 38: 726–732.
- [8] DUCET N, LETRAON P Y, REVERDIN G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 19477–19498.
- [9] MAXIMENKO N A, NIILER P P. Hybrid decade-mean global sea level with mesoscale resolution[G]//SASENA N. *Recent Advances in Marine Science and Technology*. 2005: 55–59.
- [10] LIU W T, XIE X, POLITO P S, et al. Atmospheric manifestation of tropical instability waves observed by QuikSCAT and Tropical Rain Measuring Mission[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 2545–2548.
- [11] OKUBO A. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularity such as convergences[J]. *Deep-Sea Res*, 1970, 17: 445–454.
- [12] WEISS J. The dynamics of enstrophy transfer in two dimensional hydrodynamics[J]. *Physical D Nonlinear Phenomena*, 1991, 48: 273–294.
- [13] JEONG J, HUSSAIN F. On the identification of a vortex[J]. *J Fluid Mech*, 1995, 285: 69–94.
- [14] PASQUERO C, PROVENZALE A, BABIANO A. Parameterization of dispersion in two-dimensional turbulence[J]. *J Fluid Mech*, 2001, 439: 279–303.
- [15] ISERN-FONTANET J, CARCIA-LADONA E, FONT J. Vortices of the Mediterranean Sea: an altimetric perspective [J]. *J Phys Oceanogr*, 2006, 36: 87–103.
- [16] QU T D. Upper-layer circulation in the South China Sea[J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 1450–1460.
- [17] LIANG W D, YANG J Y, TANG T Y, et al. Kuroshio in the Luzon Strait[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, doi:10.1029/2007JC004609, 2008.
- [18] 刘秦玉, 李丽娟. 北太平洋副热带向东逆流区 Rossby 波斜压稳定性[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(1): 83–91.