

南海中尺度涡年际变化特征及动力机制分析*

崔凤娟¹ 匡晓迪² 王 玉¹

(1. 中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100; 2. 国家海洋环境预报中心 北京 100081)

摘要 基于 Okubo-Weiss 函数方法对 20 年高度计资料进行涡旋识别, 分析了南海中尺度涡的时空分布, 初步研究了中尺度涡旋活动的年际变化特征及其可能的动力机制。结果显示, 南海中尺度涡旋活动具有较为显著的年际变化特征, 通过对涡旋个数、涡区面积、涡动能计算分析表明涡旋活动与 ENSO 现象遥相关: 南海中尺度涡活动在 El Niño 年较弱, 在 La Niña 年较强。可用风场异常解释南海中尺度涡的年际变化与 ENSO 现象的负相关关系。El Niño 期间南海年平均意义下的东北风场减弱, 风应力旋度绝对值减小, 从而导致了较弱的涡旋活动, 相反 La Niña 期间强劲的风场导致了涡旋活动增强。

关键词 南海; 中尺度涡; 年际变化; ENSO

中图分类号 P722.7 **doi:** 10.11693/hyhz20140900242

中尺度涡是世界海洋中无处不在的一种海洋现象, 是指与所研究的大背景流场相比尺度要小的气旋式或反气旋式海洋环流, 通常典型的空间尺度为几十到几百公里, 时间尺度为几天到上百天。观测资料与卫星资料均显示南海的中尺度涡活动十分活跃, 而南海中尺度涡的基本物理属性尚未被完全了解, 因此基于长时间序列的卫星观测资料, 选择易行、合理的自动涡旋检测算法进行涡旋识别, 对南海中尺度涡进行定性与定量研究, 并分析其季节和年际变化特征, 仍是一个十分重要的课题。

以往基于卫星观测资料的研究对南海中尺度涡的空间分布达成了较为一致的观点。Wang 等(2000)利用 1992—1997 年的 TOPEX/Poseidon(T/P)数据, 仅在 10°N 以北的两个条带状海区发现显著的南海中尺度现象: 较强的一支沿着北部/西部边界, 靠近 2000m 等深线; 另一支是约 450km 宽的东北—西南走向的条带, 从越南沿岸延伸至吕宋海峡。Wang 等(2003)基于南海中尺度涡的产生机制, 把南海分成 4 个海区, 分别是台湾岛西南、吕宋岛西北、吕宋岛西南以及越南外海, 并描述了南海中尺度涡的时空特

征。林鹏飞等(2007)利用 1993—2001 年的卫星资料进行涡旋统计, 结果发现南海西北部和东南部涡旋较少, 120°E 以东吕宋海峡附近主要产生反气旋涡, 14°—15°N, 118°—120°E 区域内亦经常出现反气旋涡, 气旋涡几乎不出现。

南海中尺度涡的生成及分布具有明显的季节特征。以往的研究表明, 不同月份产生的涡旋个数没有明显的季节变化, 但是夏季有利于生成反气旋涡, 冬季则有利于生成气旋涡。南海中尺度涡分布的季节规律表现为: 冬季, 冷涡主要分布在吕宋岛西北和越南外海, 而暖涡主要出现在吕宋西南、台湾岛西南以及越南外海; 春季, 暖涡在吕宋西北和南海中央海盆处得到充分发展; 夏季, 暖涡主要分布在越南东南和吕宋以西海域, 而冷涡分布于越南外海; 秋季, 冷涡主要分布在越南沿岸, 暖涡则分布在南海东北部(Wang *et al.*, 2003; 程旭华等, 2005; 林鹏飞等, 2007; Xiu *et al.*, 2010)。林鹏飞等(2007)利用 1993—2001 年的卫星资料统计得到 9 年间南海共产生中尺度涡 163 个, 其中反气旋涡 84 个, 气旋涡 79 个, 涡旋出现数量没有明显的季节变化, 春、夏季反气旋涡多于气旋涡, 秋

*海洋公益性行业科研项目, 201105002-11 号; 教育部科学技术研究项目, 113041A 号; 全球变化与海气相互作用, GASI-03-01-01-05 号。崔凤娟, 硕士研究生, E-mail: cfj.08@163.com

收稿日期: 2014-09-11, 收修改稿日期: 2014-11-05

季气旋涡多于反气旋涡。Xiu 等(2010)基于卫星观测及模式数据进行南海中尺度涡识别及统计, 结果显示春季是生成反气旋涡的最有利季节, 秋季是生成气旋涡的最有利季节, 而 5 月份产生的冷、暖涡均较少, 他们认为这可能是风场变化导致的。

中尺度涡有相当大的动能, 在海洋运动能量谱中是一个显著的峰区(王桂华等, 2005)。涡动能(eddy kinetic energy, EKE)也是定量衡量涡旋活动的重要物理量之一。Hwang 等(2000)利用 T/P 高度计资料发现, EKE 的季节性循环很大程度上受控于季风的季节性转向, 并受 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)事件的年际调控。Chen 等(2009)指出, ENSO 通过大气桥—风应力旋度影响南海的涡动能年际信号, 而季节周期是南海涡动能变化最显著的时间尺度。Xiu 等(2010)基于卫星观测及模式数据计算比较了南海全域平均的 EKE, 模式结果显示秋季涡动能明显高于其他季节。

以往对南海中尺度涡年际变化特征进行研究的文章较少。林鹏飞等(2007)利用 1993—2001 年的卫星资料对涡旋个数的年际变化进行了分析, 结果发现 1996 年和 2000 年出现较多的涡旋, 而相应的 1995—1996 年和 1999—2000 年间都发生 La Niña 事件, 在 1997—1998 年间发生 El Niño 事件与 1998 年产生的涡旋数量较少也能很好地联系起来, 但是林等所用数据的时间长度较短。高理等(2006)对黑潮延伸区和南海的中尺度涡进行了统计分析, 选择海平面异常(sea level anomaly, SLA)大于和小于同期均值 20cm 的数据, 统计数据网格点随时间变化, 但由于方法的限制他们仅对较大强度涡旋的面积进行了研究。

本文使用法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心(AVISO)提供的延迟时间海表面高度异常格点数据, 采用 Okubo-Weiss 函数方法结合人为设置标准进行涡旋识别, 分析了南海中尺度涡的时空分布, 统计了涡旋个数, 计算了两个定量衡量中尺度涡物理量: 涡区面积和涡动能, 从而研究了南海中尺度涡的年际变化特征, 并对其动力机制进行初步探讨。

1 数据与方法

1.1 高度计资料介绍

本文使用的卫星高度计数据为法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心(AVISO)提供的延迟时间海表面高度异常格点数据(DT-MSLA), 该数

据是 TOPEX/Poseidon、Jason-1、ERS-1 和 ERS-2 等高度计的融合产品, 已经减去了 7 年(1993 年 1 月—1999 年 12 月)的平均海表面高度。数据集的空间覆盖范围为全球, 水平方向采用 Mercator 坐标系, 分辨率为 $1/3^\circ \times 1/3^\circ \cos\theta$ (θ 是纬度)。文中选用周平均数据, 空间范围为 $2^\circ\text{N}—25^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E}—123^\circ\text{E}$, 时间范围为 1993 年至 2012 年。

1.2 涡旋识别方法

本文采用 Okubo-Weiss 函数方法(O-W 方法)结合人为设置标准进行涡旋识别。

Okubo(1970)和 Weiss(1991)引进 Okubo-Weiss 函数 q 用以进行流场分区, 并鉴别出流场中的涡旋结构。该函数定义为: $q = S_n^2 + S_s^2 - \omega^2$, 其对变形和旋转的相对重要性进行了量化。其中 $S_n^2 + S_s^2$ 为平方变形率, 描述流体的变形; ω^2 是涡度拟能, 描述流体的旋转。 $S_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ 是与线度变化(容变)相关的速度变形量, $S_s = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 是与畸变相关的速度变形量。二者分别表征引起流体元压缩和膨胀的流体元表面法向胀压过程和通过角变形来体现的流体元表面切向剪切过程。 $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 是相对涡度的垂直分量, 表征流体水平旋转。

Okubo-Weiss 函数的物理意义可以理解为: $q > 0$ 时, 流场以变形为主, $q < 0$ 时, 流场以旋转为主, 即以涡旋形式存在。因此, 在实际应用中往往取一负的参数 q_0 (q_0 取为 $-0.2 \delta_q$, δ_q 为全区 q 的标准差), 将流区分为三个部分: $q \geq -q_0$ 的区域, 流场以变形为主; $q \leq q_0$ 的区域, 流场以旋转为主; 而 $q_0 < q < -q_0$ 的区域, 则为背景场区。

O-W 方法鉴别中尺度涡的优势在于: 仅利用 SLA 数据推导出的单一函数 q 即可将二维流场分区, 从而识别出涡旋结构。其缺陷在于: 该方法局限于探测涡核心区(Basdevant *et al*, 1994), 可能对涡旋半径及涡区面积有所低估, 另外, 此方法有涡旋数量探测过剩的趋势(Nencioli *et al*, 2010)。考虑到 O-W 方法本身并未对涡旋的水平尺度、强度等进行限制, 这可能是造成其识别出的涡旋数量过剩的原因之一, 故在 O-W 函数方法的基础上, 设定以下标准进行涡旋识别(本文识别出的中尺度涡实为涡旋核心区)

O-W 参数阈值 q_0 的闭合等值线作为涡旋核心

的边界;

以 q_0 闭合等值线上最东与最西端、最南与最北端之间距离之和的一半作为涡旋直径, 直径超过 90km 方为涡旋核心区;

以 q_0 闭合等值线上所有点的经纬度平均值作为涡旋中心点的经纬度。鉴于高度计资料在浅海误差较大, 中心位于 1000m 以浅海域的涡旋不作统计;

将涡旋中心与边界的高度差定义为涡旋的强度。由于高度计 SLA 资料的测量误差一般为 2—3cm, 在整个生命周期中涡旋的强度不小于 4cm;

借鉴林宏阳等(2012)的标准, 本文对涡旋“传播”的定义为: 相邻两个时间间隔内涡旋中心的移动距离不超过 100km。在此基础上对中尺度涡的统计要求其从开始到结束的持续时间不短于 5 周。

2 结果与分析

2.1 南海中尺度涡的空间分布

图 1 展示了 O-W 方法结合本研究设置的标准进行涡旋识别所得到的南海中尺度涡的空间分布在。图中标记的是涡旋产生时的中心位置。如图所示, 南海中尺度涡大都产生于 2000m 以深海域, 冷暖涡几乎遍布 10°N 以北除东南部外的整个南海深海海盆, 10°N 以南海域几乎没有中尺度涡生成。涡旋集中于越南东南海域、吕宋岛以西海域、台湾岛西南海域以及沿着海盆西北部 2000m 等深线分布。这与 Hwang 等(2000), Wang 等(2000), 程旭华等(2005), 林鹏飞等(2007)的结果较为一致。此外, 本文结果还验证了林鹏飞等(2007)的结论: 120°E 以东吕宋海峡附近以及 14° — 15°N 、 118° — 120°E 区域内几乎不会产生气旋涡。

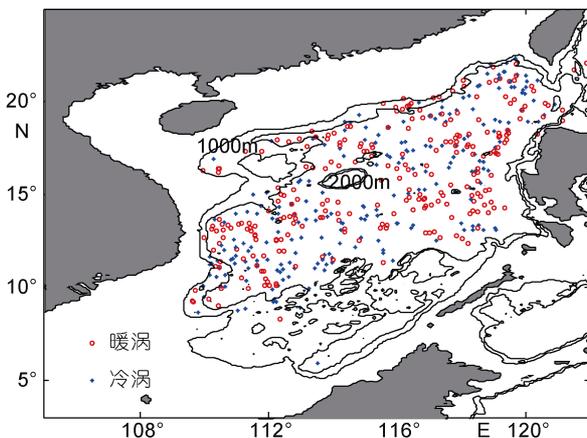


图 1 涡旋源地空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of eddy birthplace

2.2 南海中尺度涡的季节变化

2.2.1 涡旋的空间分布 经 O-W 方法结合本研究设置标准识别, 图 2 按不同季节, 即春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12—次年 2 月)展示了 1993 年 3 月至 2013 年 2 月 20 年间统计得到的南海中尺度涡空间分布。南海中尺度涡的生成及分布具有明显的季节变化特征: 冬季, 冷涡明显多于暖涡, 冷涡主要产生于吕宋岛西北、越南以东偏南海域, 而暖涡主要分布在吕宋岛西南、越南以东偏北海域以及海盆北部 2000m 等深线; 春季, 吕宋岛西北的冷涡开始衰退, 越南以东偏北海域的反气旋涡得到进一步发展, 冷涡主要分布在台湾岛西南以及越南以东偏南海域; 夏季, 冷涡较少, 几乎只在越南以东偏北海域出现, 暖涡主要集中在越南东南海域、吕宋岛西北海域以及海盆西北部 2000m 等深线; 秋季, 越南东南海域的暖涡开始衰退, 冷涡主要分布在深海海盆的西南部, 暖涡则主要集中于吕宋西北、台湾岛西南。值得注意的是, 在越南东南海域和吕宋岛以西海域分别有两群涡旋聚集。在越南东南, 冬季气旋涡控制着南部, 反气旋涡控制着北部, 此现象一直持续到春季, 夏季与之相反, 气旋涡控制着北部, 反气旋涡控制着南部; 吕宋岛以西, 冬季气旋涡控制着北部, 反气旋涡控制着南部。

2.2.2 涡旋个数 逐月统计产生于 1993 年 3 月至 2013 年 2 月 20 年间的南海中尺度涡旋个数, 如图 3 所示。春季产生中尺度涡 138 个, 其中 61 个气旋涡, 77 个反气旋涡; 夏季产生中尺度涡 123 个, 其中 43 个气旋涡, 80 个反气旋涡; 秋季有 106 个中尺度涡产生, 其中 46 个气旋涡, 60 个反气旋涡; 冬季有 122 个中尺度涡产生, 其中 78 个气旋涡, 44 个反气旋涡。涡旋个数没有明显的季节变化特征, 这与林鹏飞等(2007)的结论一致; 在冬季向春季过渡的 2—3 月产生的中尺度涡最多, 秋季向冬季过渡的 11—12 月产生的中尺度涡最少, 这与林宏阳等(2012)的结论较为一致。夏季是产生反气旋涡的有利季节, 冬季是产生气旋涡的有利季节, 而冬、夏季风转换期(春、秋两季)的反气旋涡略多于气旋涡。

2.2.3 涡动能 中尺度涡有相当大的动能, 在海洋运动能量谱中是一个显著的峰区(王桂华等, 2005)。涡动能被认为与涡旋活动动力上密切相关, 在海洋能量传播过程中起着重要作用。鉴于南海是中尺度涡高发区, 以往已经有较多研究关注于南海涡动能的空间分布特征及时间变化规律(如: Cheng *et al*, 2010;

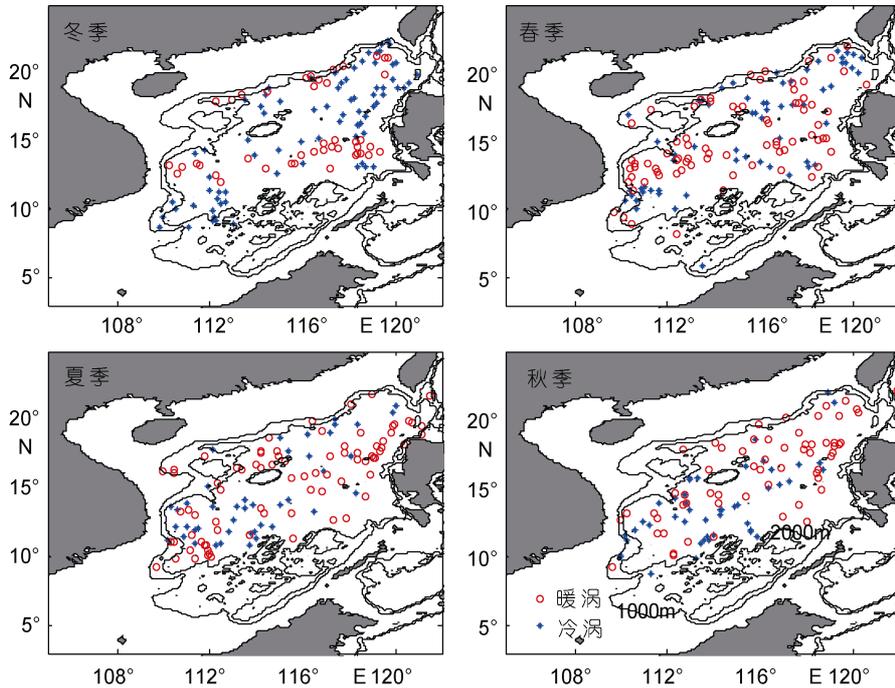


图 2 涡旋源地空间和季节分布图
Fig.2 Spatial and seasonal distributions of eddy birthplace

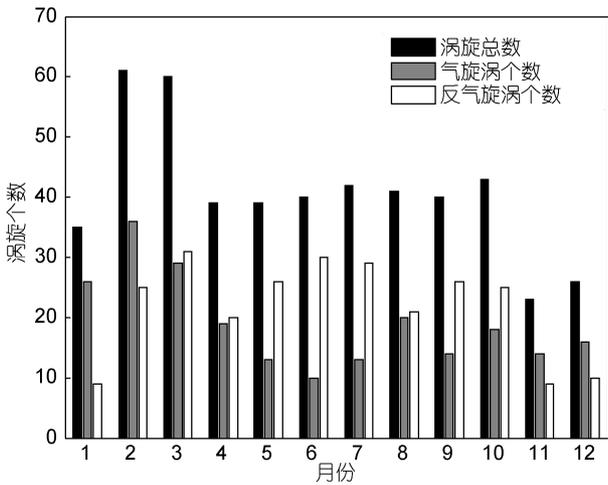


图 3 南海逐月产生的中尺度涡旋个数
Fig.3 Monthly variability of mesoscale eddies' numbers in the South China Sea

Wang *et al*, 2012)。本文采用上文所述的长时间序列的连续 SLA 资料对南海涡旋运动进行了涡动能计算及分析。

基于地转平衡和各向同性假设, 涡动能(EKE)的计算方法为: $EKE = \frac{1}{2}(U_g'^2 + V_g'^2)$, 其中 $U_g' = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial y}$ 和

$V_g' = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial x}$ 分别为纬向和经向地转流速异常。式中, η' 为 SLA, g 是重力常数, f 是科氏参数。

利用 1993 年 1 月至 2012 年 12 月 20 年的高度计资料计算得到南海 200m 以深气候态涡动能的空间分布(图 4), 鉴于高度计资料在浅海误差较大, 将 200m 以浅海域计算结果舍去。可以看出, 南海存在两个涡动能高值中心, 即越南以东海域及台湾岛西

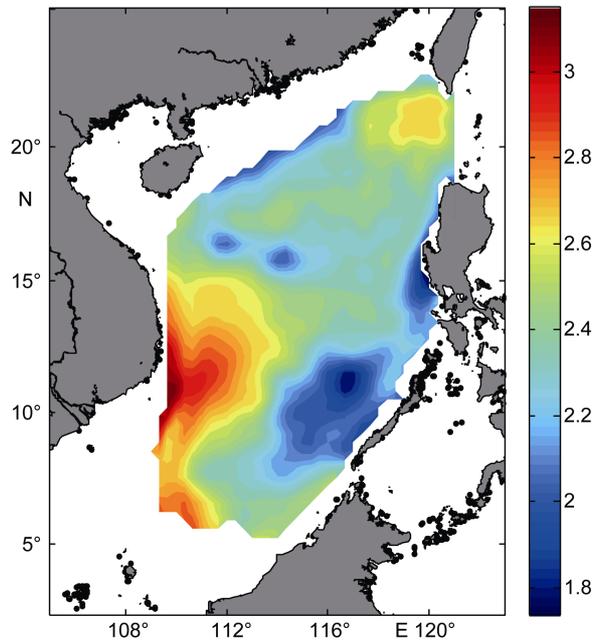


图 4 1993—2012 年气候态平均南海涡动能空间分布图
Fig.4 Spatial distribution of the climatological (year 1993-2012) EKE in the South China Sea

南海域,这与 Chen 等(2009)、Cheng 等(2010)结果相同;而在南海的东南海域及南海西北边界处存在涡动能低值区,这与上文较符合。

计算多年逐月平均的南海 200m 以深全域平均涡动能(图 5),得到春、夏、秋、冬四季 EKE 分别占总能量的 19.45%、26.31%、30%和 24.24%,涡动能最高值出现在 10 月,此结果与 Cheng 等(2010)等求得的最大值出现在 12 月不符,可能是所采用数据的时间范围差异导致;涡动能的最低值出现在 3 月,与 Chen 等(2009)结果相同。从季节尺度上来看,全域平均的涡动能在秋季最大,此结果与前人研究相同(如: Xiu *et al.*, 2010),涡动能在春季最小。

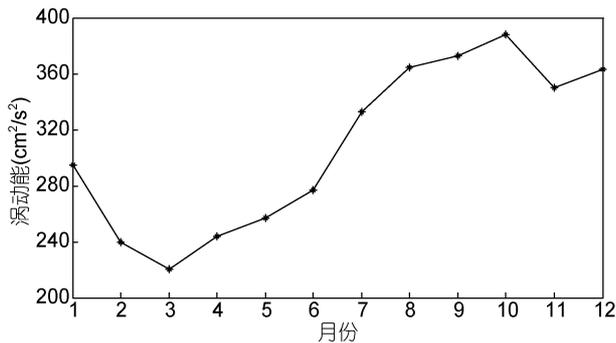


图 5 多年逐月平均的南海全域平均涡动能
Fig.5 Monthly EKE in the South China Sea

2.3 南海中尺度涡的年际变化特征

以往研究多关注揭示南海中尺度涡生成及分布的季节变化特征,基于长时间序列的卫星观测资料对南海中尺度涡的年际变化特征的文章较少。本文基于 O-W 方法,从个数、面积、涡动能等几个方面分析南海中尺度涡的年际变化特征,并对其可能的动力机制进行了初步探讨。

通过涡旋识别,经统计,1994—2008 年间南海区域共产生中尺度涡 363 个,其中气旋涡 174 个,反气旋涡 189 个,冷、暖涡个数相近,暖涡略多于冷涡;平均每年产生中尺度涡 24—25 个,这与林宏阳等(2012)的结果十分相近。

统计发现不同年份产生的涡旋个数差别很大。1994—2008 年间存在两个涡旋个数显著多于平均值的时间段:1995—1996 年和 1998—2000 年,这 5 年分别产生中尺度涡 27、33、31、34 和 28 个,这似乎与 1995/1996 及 1999/2000 期间的 La Niña 事件有比较好的对应。1997、2004、2006 年发生 El Niño 事件,相应的涡旋产生较少,分别为 22、18 和 19 个。这些均

说明南海中尺度涡的产生个数具有较为明显的年际变化规律,并且可能与 ENSO 现象存在一定的联系。

为了进一步探讨南海涡旋年际变化特征与 ENSO 现象的联系,本文计算了定量衡量涡旋活动的重要物理量涡区面积。将涡旋视为圆,用公式 $S = \frac{\pi D^2}{4}$ (D 为识别出的涡旋的直径,其定义如上文所述)近似计算涡区面积,得到的平均涡区面积约为 65404km^2 ,较 Xiu 等(2010)计算所得的结果小,其原因可能是使用的涡旋鉴别方法不同,本文增加的涡旋强度等限制使得识别出的涡旋个数及涡区面积都比 Xiu 等(2010)的结果要小。

计算涡区面积异常值并对其进行 13 个月滑动滤波,将季节信号及季节内信号滤掉,只保留年际尺度信号。将计算所得的 1994—2008 年的涡区面积异常值年际信号进行 Morlet 小波分析,得到周期图。从图 6 中可以看出,超过 99%置信限(虚线为红噪声检验)有两个显著周期位于 3—4 年之间,猜想此信号可能与 ENSO 现象相关。图 7 定性展示涡区面积异常值年际信号与 Niño3.4 指数相关关系,计算两者的相关性,在滞后 1 个月时相关系数为 -0.3039 ,通过信度检验。因此,南海涡区面积的年际变化较为明显,与 ENSO 负相关,即:南海涡区面积在 El Niño 年相对较小,在 La Niña 年相对较大。

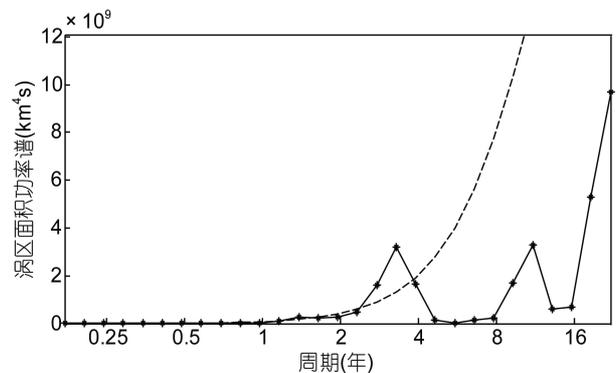


图 6 涡区面积年际变化周期图

Fig.6 Periodogram of interannual eddy area variability
黑色实线为涡区面积年际信号的功率谱;虚线为 99%置信限检验

涡动能是对涡旋存在状态进行定量描述的另一重要物理量。对计算所得的涡动能时间序列进行类似于上述涡区面积的处理,得到南海涡动能异常值的年际信号。对其进行 Morlet 小波分析,得到周期图 8。超过 99%置信限的最显著周期为 3.276 年,说明南

海涡动能除季节性变化外还有较为显著的年际变化特征, 猜想南海涡动能亦与 ENSO 现象遥相关。图 9 定性展示标准化涡动能异常值年际信号与 Niño3.4 指数相关关系。计算两者的相关性得到在滞后 1 个月时为-0.4624, 通过信度检验。因此, 南海涡动能的年际变化亦较为明显, 与 ENSO 负相关, 此结果与前人的研究结果吻合(如: Chen *et al*, 2009), 即: 南海涡动能在 El Niño 年相对较小, 在 La Niña 年相对较大。

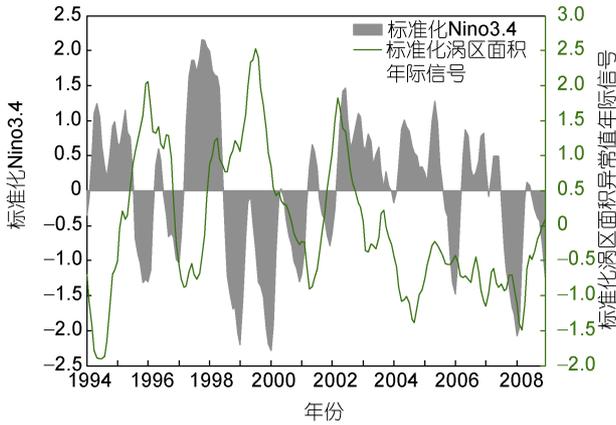


图 7 标准化涡区面积异常值年际信号与 Niño3.4 指数相关关系示意图

Fig.7 Correlation between standardized eddy area interannual variability and Niño3.4 index

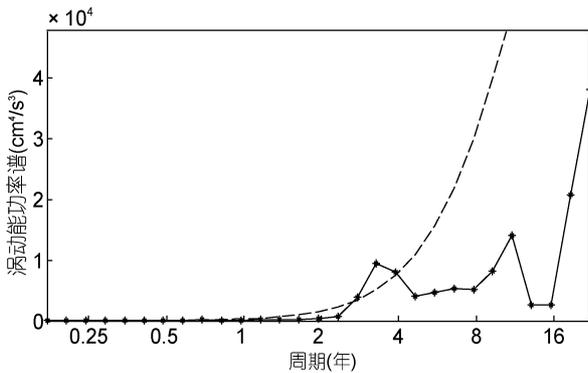


图 8 涡动能年际变化周期图

Fig.8 Periodogram of interannual EKE variability
黑色实线为涡动能年际信号的功率谱; 虚线为 99%置信限检验

2.4 南海中尺度涡年际变化动力机制的初步探讨

南海位于东亚季风区, 夏季盛行西南季风, 冬季盛行东北季风。如图 10 所示南海年平均下为东北风, 风应力旋度绝对值高值区(台湾岛西南、吕宋岛以西、越南东南)与南海中尺度涡多发区对应较好。以往研究表明南海中尺度涡旋活动与风场密切相关(如: 王桂华, 2004; 林鹏飞, 2005; 陈更新, 2010)。上节研究

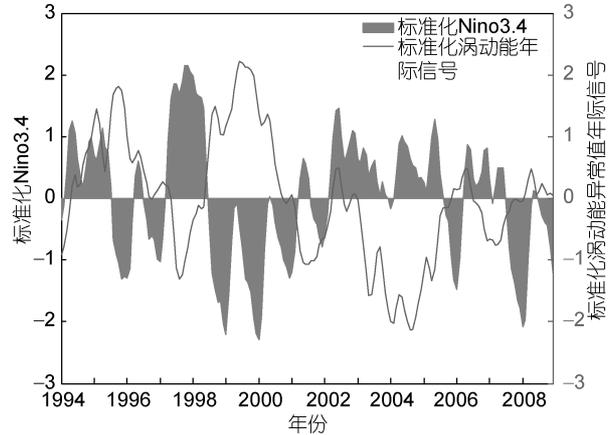


图 9 标准化涡动能异常值年际信号与 Niño3.4 指数相关关系示意图

Fig.9 Correlation between standardized EKE interannual variability and Niño3.4 index

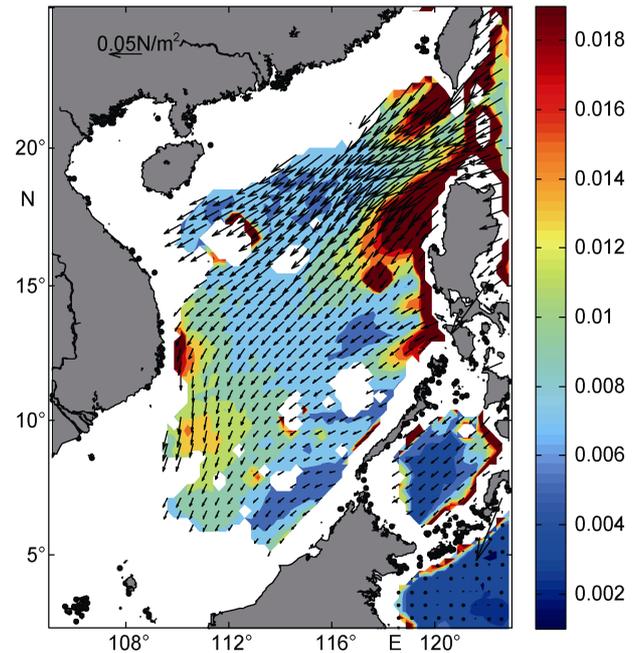


图 10 气候态年平均南海表面风应力和风应力旋度绝对值
Fig.10 Annual mean surface wind stress and absolute wind stress curl in the South China Sea

矢量箭头表示风应力, 单位: N/m²; 填色为风应力旋度绝对值, 单位: N/m³

发现南海中尺度涡活动具有较为显著的年际变化规律, 即: 涡旋活动在 El Niño 年较弱, 在 La Niña 年较强。由于风应力(旋度)驱动是中尺度涡产生的重要机制之一, 推测可用风场异常解释南海中尺度涡的年际变化与 ENSO 现象的负相关关系。图 11 为南海年平均风应力异常和风应力旋度绝对值异常场, 其中: (a)1997 年(典型 El Niño 年)异常场; (b)1999 年(典型

La Niña 年)异常场。计算风应力和风应力旋度时使用的是 CCMP 卫星遥感海面 10m 风速数据。如图所示, El Niño 期间南海中尺度涡多发区(除东南部外的整个南海深海海盆)出现西南风异常, 减弱了此区域的背景东北风场, 风应力对海水的搅拌作用较正常年份较弱, 导致海水层化加强, 抑制海水的垂向运动; 而在涡旋多发的东北-西南走向的条带内, 尤其是在台湾岛西南、吕宋岛以西、越南东南的风应力旋度绝对值出现显著的负异常, 说明大气向海洋输入的涡度减少, 这些均导致南海涡旋活动减弱。相反 La Niña 期间南海中尺度涡多发区出现东北风异常, 增强了此区域的背景东北风; 风应力旋度绝对值亦在涡旋

多发区出现显著的正异常, 说明大气向海洋输入的涡度增加, 此期间较强的涡旋活动是由强劲的风场导致的。

为定量研究局地风应力与涡旋活动的关系, 计算南海全域平均的涡动能与风应力旋度绝对值的相关性, 得到相关系数为 0.2411 通过信度检验。同样将 1997、1999 年作为 El Niño 和 La Niña 事件的代表年份, 通过计算可知涡动能在 1997 年较气候态年平均减少了 3.724%, (此结果与上文得出的 EKE 年际变化与 ENSO 现象负相关的结论吻合得很好), 风应力旋度绝对值减少了 8.784%; 而涡动能在 1999 年较气候态年平均增加了 11.834%, 相应的风应力旋度绝对值增加了 11.486%。涡动能和风应力旋度绝对值在 El Niño 和 La Niña 年的减、增幅度比较相近, 此结果在上文定性分析的基础上侧面验证了局地风应力确为涡旋活动的重要影响因素之一。由于除局地风场外, 南海中尺度涡的形成、维持和传播, 还受到黑潮、海底地形、海岸线、惯性效应等多种因素的作用和影响, 对涡旋活动影响因素的详细定量分析还有待后续研究中进一步展开。

3 结论与展望

本文基于 O-W 函数方法利用 20 年高度计资料进行涡旋识别, 分析了南海中尺度涡时空分布的统计特征, 经初步研究得到如下结论。

(1) 南海中尺度涡大都产生于 2000m 以深海域, 冷暖涡几乎遍布 10°N 以北除东南部外的整个南海深海海盆。涡旋集中于越南东南海域、吕宋岛以北海域、台湾岛西南海域以及沿着海盆西北部 2000m 等深线分布, 其生成及分布在空间上具有明显的季节变化特征。涡旋个数没有明显的季节性, 但夏季是产生反气旋涡的有利季节, 冬季是产生气旋涡的有利季节。对南海中尺度涡季节特征的研究及与前人成果的对照表明, 本文使用的涡旋探测方法具有良好效果及可行性。

(2) 南海中尺度涡旋活动具有较为显著的年际变化特征, 本文对涡旋个数、涡区面积、涡动能的计算分析均表明, 涡旋活动与 ENSO 现象遥相关: 南海中尺度涡活动在 El Niño 年较弱, 在 La Niña 年较强。

(3) 可用风场异常解释南海中尺度涡的年际变化与 ENSO 现象的负相关关系。El Niño 期间南海年平均意义下的东北风场减弱, 风应力旋度绝对值减小, 从而导致了较弱的涡旋活动, 相反 La Niña 期间

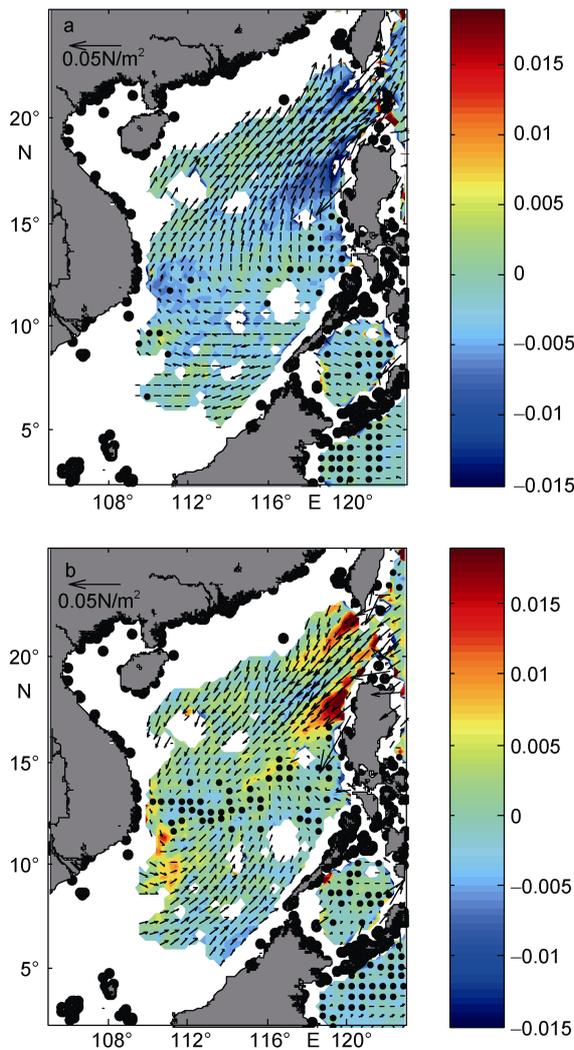


图 11 1997 年(a)和 1999 年(b)南海表面年平均风应力异常和风应力旋度绝对值异常

Fig.11 1997(a) and 1999(b) surface wind stress anomalies and absolute wind stress curl anomalies

矢量为风应力, 单位: N/m^2 ; 填色为风应力旋度绝对值异常, 单位: N/m^3

强劲的风场导致了涡旋活动增强。

本文得出的结论主要针对南海中尺度涡的统计特征,对影响涡旋年际变化的动力机制只进行了初步分析。南海是一个季风控制的、地形复杂的半封闭海盆,南海的中尺度现象及其变化不仅丰富并具有独特性。南海季风的直接强迫作用是产生中尺度涡的主要原因之一(Chao *et al*, 1996; Fang *et al*, 2002),同时,由于平均流的不稳定性,季风驱动的南海西边界流也可以导致中尺度涡的产生。南海中尺度涡不仅在季节变化上受控于局地风场,而且在年际尺度上的变化也与局地风场具有良好的相关性(Chen *et al*, 2010)。本文就是通过这种大气桥,探讨了南海中尺度涡与 ENSO 现象的相关性。除了风场的直接作用和间接作用,南海中尺度涡的形成、维持和传播还受到黑潮、海底地形、海岸线、惯性效应等多种因素的作用和影响。例如,黑潮在流经吕宋海峡时,失去陆坡支持后变得不稳定,发生尺度较大的蛇行,跨越吕宋海峡,并分离出中尺度涡旋。这类中尺度涡旋主要出现在南海北部,尺度在百公里左右(李立, 2002)。因此,在后续的南海中尺度涡年际变化的研究中,还需要进一步考虑黑潮等因素的作用。

参 考 文 献

- 王桂华, 2004. 南海中尺度涡的运动规律探讨. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉, 2005. 南海中尺度涡研究进展. 地球科学进展, 20(8): 882—886
- 李立, 2002. 南海中尺度海洋现象研究概述. 台湾海峡, 21(2): 265—274
- 陈更新, 2010. 南海中尺度涡的时空特征研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文
- 林宏阳, 胡建宇, 郑全安, 2012. 南海及西北太平洋卫星高度计资料分析: 海洋中尺度涡统计特征. 台湾海峡, 31(1): 105—113
- 林鹏飞, 2005. 南海和西北太平洋中尺度涡的统计特征分析. 青岛: 中国科学院海洋研究所
- 林鹏飞, 王凡, 陈永利等, 2007. 南海中尺度涡的时空变化规律. 统计特征分析. 海洋学报, 29(3): 14—22
- 高理, 2006. 黑潮延伸区与南海的海平面异常及中尺度涡的统计分析. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 程旭华, 齐义泉, 王卫强, 2005. 南海中尺度涡的季节和年际变化特征分析. 热带海洋学报, 24(4): 51—59
- Basdevant C, Philipovitch T, 1994. On the validity of the “Weiss criterion” in two-dimensional turbulence. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 73(1—2): 17—30
- Chao S Y, Shaw P T, Wu S Y, 1996. El Niño modulation of the South China sea circulation. *Progress in Oceanography*, 38(1): 51—93
- Chen G X, Hou Y J, Chu X Q *et al*, 2009. The variability of eddy kinetic energy in the South China Sea deduced from satellite altimeter data. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(4): 943—954
- Chen G X, Hou Y J, Zhang Q L *et al*, 2010. The eddy pair off eastern Vietnam: Interannual variability and impact on thermohaline structure. *Continental Shelf Research*, 30(7): 715—723
- Cheng X H, Qi Y Q, 2010. Variations of eddy kinetic energy in the South China Sea. *Journal of oceanography*, 66(1): 85—94
- Fang W D, Fang G H, Shi P *et al*, 2002. Seasonal structures of upper layer circulation in the southern South China Sea from in situ observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978—2012)*, 107(C11): 23-1—23-12
- Hwang C, Chen S A, 2000. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978—2012)*, 105(C10): 23943—23965
- Nencioli F, Dong C M, Dickey T *et al*, 2010. 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. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(3): 564—579
- Okubo A, 1970. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep sea research and oceanographic abstracts*, 17(3): 445—454
- Wang G H, Su J L, Chu P C, 2003. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data. *Geophysical Research Letters*, 30(21): OCE 6—1
- Wang H, Wang D K, Liu G M *et al*, 2012. Seasonal variation of eddy kinetic energy in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(1): 1—15
- Wang L P, Koblinsky C J, Howden S, 2000. Mesoscale variability in the South China Sea from the TOPEX/Poseidon altimetry data. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 47(4): 681—708
- Weiss J, 1991. The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 48(2—3): 273—294
- Xiu P, Chai F, Shi L *et al*, 2010. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993—2007. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978—2012)*, 115(C3): C03012

THE ANALYSIS ON INTERANNUAL VARIATION CHARACTERISTICS OF EDDY ACTIVITIES AND ITS DYNAMIC MECHANISM IN THE SOUTH CHINA SEA

CUI Feng-Juan¹, KUANG Xiao-Di², WANG Yu¹

(1. *College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China*)

Abstract The present study analyses temporal and spatial characteristics of mesoscale eddies in the South China Sea (SCS), identified by the altimeter data with Okubo-Weiss method. In addition, we examine the interannual variation of mesoscale eddies and its dynamic mechanism. Our results show that there is prominent interannual variation of mesoscale eddies in the SCS. And it has a negative correlation with ENSO events suggested by the analysis of number of eddies, total eddy area and eddy kinetic energy: mesoscale eddy activities are weak (strong) in El Niño (La Niña) years. The wind stress curl decrease (increase) as climatological northeast wind fields weaken (strengthen) in El Niño (La Niña) years, leading to a weak (strong) eddy activities.

Key words South China Sea; mesoscale eddy; interannual variability; ENSO