

# 1992—2011 年夏季南海西部离岸流区涡流 相互作用特征\*

李 晗<sup>1,2</sup> 王 强<sup>1</sup> 黄 科<sup>1</sup> 刘钦燕<sup>1</sup> TILAK Priyadarshana<sup>3</sup>  
管玉平<sup>1</sup> 王东晓<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室 广州 510301; 2. 中国科学院大学 北京 100049;  
3. Faculty of Fisheries and Marine Sciences & Technology University of Ruhuna Matara Sri Lanka)

**摘要** 本文利用南海海洋再分析产品 REDOS(Reanalysis Dataset of the South China Sea)和风场资料 CCMP(Cross-Calibrated, Multi-Platform), 从能量学角度探讨了 1992—2011 年夏季(6—9 月)越南离岸流区域涡-流相互作用特征, 并通过能量收支方程诊断评估了风应力、压力梯度、正压不稳定以及平流的相对贡献。以越南离岸流的强度作为分类标准, 对 1992—2011 年划分为正异常年、负异常年和正常年。结果表明, 在正异常年, 涡动能 EKE(Eddy Kinetic Energy)和涡势能 EPE(Eddy available Potential Energy)极大值主要分布在越南离岸流附近; 在负异常年, EKE 极大值向南北两侧分散, EPE 极大值向北延伸; 在正常年, EKE 和 EPE 的极值空间分布介于正负异常之间。斜压不稳定是 EPE 年际变化的主要因素, 越南离岸流影响周围海域的速度和密度分布, 是斜压不稳定的主要原因。而影响 EKE 年际变化的因素较为复杂, 压力做功是最主要的影响因素, 风应力做功和平流做功次之, 正压不稳定最小, 其中正压不稳定依赖于流速大小和由风应力旋度扰动引起的上层水平流速剪切。

**关键词** 越南离岸流; 能量学分析; 涡-流相互作用; 年际变化

**中图分类号** P731 doi: 10.11693/hyh20170400086

南海是全球最大的半封闭深水边缘海之一, 面积约为 350 万 km<sup>2</sup>, 平均深度逾 1200m, 最深可达 5000m 以上, 它通过台湾海峡与东海相连, 通过吕宋海峡与太平洋相通, 经马六甲海峡和安达曼海与印度洋相接, 又经卡里马塔海峡和巴士海峡分别与爪哇海和苏禄海相连, 是印度洋与太平洋水团和能量交换的重要通道。南海属于亚热带季风气候, 冬季盛行东北季风, 夏季盛行西南季风, 是一个典型受季风驱动的海域(Wyrtki, 1961), 且存在西向强化现象, 冬季为海盆尺度的气旋式环流, 夏季南海北部为东北

向漂流, 南部为反气旋式环流(Fang *et al*, 1998; Hu *et al*, 2000)。

南海西部海域, 冬季主要表现为南向的西边界流, 夏季主要表现为东、东北向离岸流。不同文献对夏季这一流动的称谓有所不同, 如越南离岸流(Cai *et al*, 2007; 王东晓等, 2013; Quan *et al*, 2016)、夏季东向流(Wang *et al*, 2006; Bayler *et al*, 2008; Li *et al*, 2014)、离岸急流(Gan *et al*, 2008; Xu *et al*, 2008; Zeng *et al*, 2009; Zhuang *et al*, 2010)等, 在本文中统一使用越南离岸流。已有研究表明, 越南离岸流具有显著地

\* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)项目, XDA11010302 号; 国家自然科学基金项目, 41576012 号, 41628601 号, 41606030 号; 广州市科技计划珠江科技新星专项项目, 201610010148 号; 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)自主研究项目, LTOZZ1601 号, KLOCW1604 号; 广东省自然科学基金项目, 2016A030310015 号。李 晗, 硕士研究生, E-mail: lihandamon@163.com

通讯作者: 王 强, 副研究员, E-mail: wqiang@scsio.ac.cn

收稿日期: 2017-04-07, 收修改稿日期: 2017-05-10

转运动特征(Hu *et al.*, 2000; 王东晓等, 2013), 主要位置集中在  $10^{\circ}$ — $14^{\circ}$ N, 平均约为  $12^{\circ}$ N; 卫星观测、现场观测和数值模拟均表明离岸流位置摆动变化与强度之间存在一定联系, 位置偏南时强度偏大, 偏北时强度偏小, 向北偏离时偏离程度更大(Cai *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2014; Quan *et al.*, 2016)。

越南离岸流受季风变化的控制(Xie *et al.*, 2003), 其流轴主要沿风应力旋度零线附近分布(王东晓等, 2013)。另外, 南海风场与厄尔尼诺事件有关(Yang *et al.*, 2013; Quan *et al.*, 2016), 因此越南离岸流呈现一定的年际变化: 厄尔尼诺发展(衰退)年夏季, 南海西南季风加强(减弱), 呈偏西(南)风, 越南离岸流流轴偏南(北), 强度增加(减弱)。越南离岸流的变化也与边界层动力学和 30—60 天季节内振荡有密切联系(Gan *et al.*, 2008)。越南离岸流伴随强烈的上升流动力过程, 该上升流存在明显的季节内和年际变化, 安南山脉对西南季风的阻断和山脉以南的侧风加速导致风急流诱发的风应力旋度是引起沿岸上升流的主要因素(Xie *et al.*, 2003)。冷水随越南离岸流向南海中部流动, 同时南海西部的西南强风使得局地海流上涌, 二者共同导致夏季南海中西部海表温度降低, 并使得叶绿素浓度和浮游植物密度均较高(Xie *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2007)。安南山脉以东的空气因气流过山变得干燥, 加之这一海域海表面温度降低, 导致夏季南海西部降水较少(Xu *et al.*, 2008; Zeng *et al.*, 2014b)。这些都表明越南离岸流对夏季南海中西部的生态环境具有显著影响。

南海西部海域也是海洋涡旋活跃地区之一, 夏季多存在较强的涡旋(Wang *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2010)。在历史观测资料和数值模拟中, 在越南离岸流南北两侧常伴随存在一对反气旋和气旋式涡旋(Wang *et al.*, 2006; Bayler *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2013; Zeng *et al.*, 2017)。双涡结构的分布位置及其强度受夏季西南季风的强度、风向及风应力旋度的影响(Chen *et al.*, 2010), 其存在与否及其年际变化特征也受 ENSO 的调制(Chu *et al.*, 2017; Xiang *et al.*, 2016)。平流作用是双涡结构存在剧烈的季节内变化的重要原因(Xiang *et al.*, 2016)。越南离岸流的非线性涡度输送对双涡结构的产生至关重要(Wang *et al.*, 2006), 越南离岸流与双涡结构存在强烈的相互作用, 使南海西部海域的涡动能在南海最强(He *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2013)。

以往对于夏季南海西部环流, 尤其是越南离岸流的研究多集中在风场对环流的驱动及其变化规律,

除了外部风场做功以外, 海洋内部存在复杂的能量转换, 但针对性地从能量学的角度探讨这一区域涡流相互作用的相关工作较少(Zhuang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2013)。能量学分析对探讨南海西部的海洋内部动力过程是必要的, 它不但可以解释海洋环流的变化特征, 还可以通过能量的传递和转化过程, 呈现中小尺度的海洋内部相互作用。本文主要通过能量诊断方程, 从能量学的角度探讨 1992—2011 年期间夏季南海西部涡流相互作用的年际变化。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

本文使用的海洋资料为南海再分析数据 REDOS(Reanalysis Dataset of the South China Sea; Zeng *et al.*, 2014a), 区域为  $1^{\circ}$ — $30^{\circ}$ N,  $99^{\circ}$ — $134^{\circ}$ E, 时间跨度为 1992 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日。主要包含海表面高度、三维温度、盐度、海流等变量, 垂向分 24 层, 覆盖海表至水深 1200m, 水平分辨率为  $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ , 时间分辨率为 1 天。REDOS 同化了卫星观测的海表高度异常、卫星及船舶观测的海表温度、地转海洋学实时观测阵 Argo(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)、世界海洋数据集 WOD09(World Ocean Database 2009)、中国科学院南海海洋研究所航次获取的温盐深仪 CTD(Conductance, Temperature, Depth)资料(Zeng *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2016a, b)和投弃式温度剖面测量仪 XBT(Expendable Bathythermograph)资料。REDOS 资料可基本呈现南海各基本物理量的主要特征及其变化(Zeng *et al.*, 2014a)。

为进一步验证 REDOS 对于夏季南海西部环流的模拟情况, 本文将 REDOS 的海表面高度与 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)卫星观测的绝对海表动力高度 ADT(Absolute Dynamic Topography)进行了比对(图 1)。AVISO 卫星观测时间跨度为 1993 年 1 月 1 日到 2011 年 12 月 31 日, 空间分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ , 时间分辨率为 1 天。

REDOS 和 AVISO 资料 1993—2011 年夏季(6—9 月平均)海表高度平均分布如图 1 所示, 均可以看出, 夏季南海西部海域主要特征为越南离岸流及其南北的双涡结构, 约以  $12^{\circ}$ N 为分界, 其南、北分别呈现反气旋式涡旋和气旋式涡旋, REDOS 强度略弱。其中双涡结构的北部气旋式涡旋主要分布在  $110^{\circ}$ — $114^{\circ}$ E,

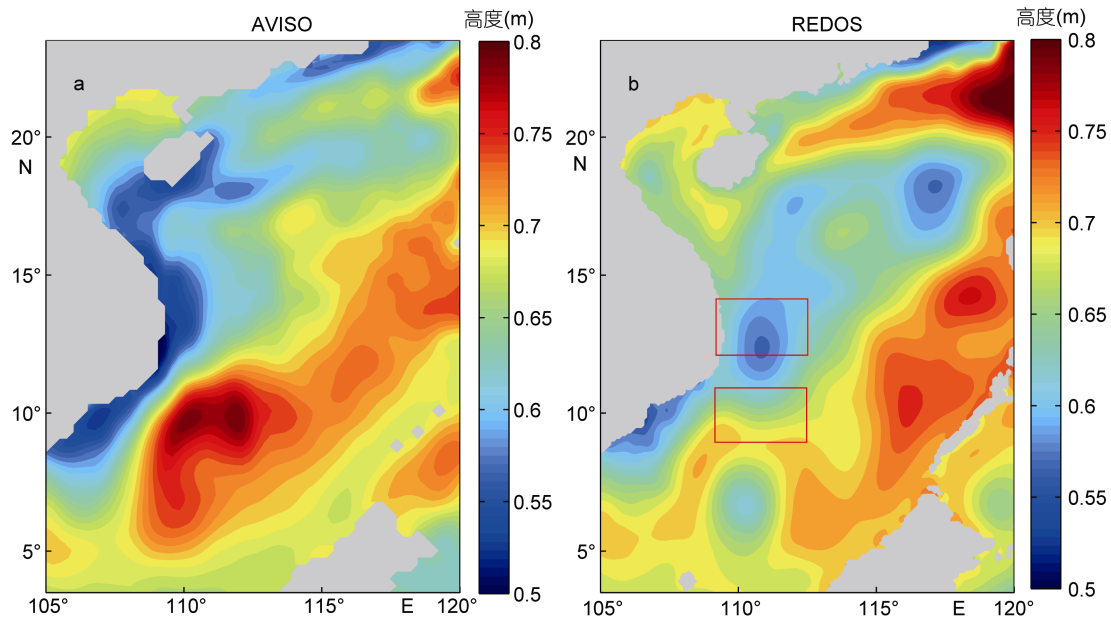


图 1 1992 至 2011 年 6—9 月海表面高度的气候态平均

Fig.1 Climatological sea surface height of AVISO(a) and REDOS(b) data, respectively, from June to September, 1992 to 2011  
注: a: AVISO 数据; b: REDOS 数据(红框所选区域分别为表示位于 110°—114°E, 11.5°—14.5°N 的北部气旋式涡旋, 和位于 110°—114°E, 7.5°—10.5°N 的南部反气旋式涡旋)

11.5°—14.5°N, 南部反气旋式涡旋主要分布在 110°—114°E, 7.5°—10.5°N, 分别记为 NP(North Pole) 和 SP(South Pole)。通过对比发现, REDOS 在气候态上模式结果对越南离岸流南侧的反气旋涡有些低估, 异常出现的气旋涡使得这一反气旋涡不明显, 这与模式中反映的该区域强烈的年际变化是相关的。由于双涡结构的位置是不稳定的, 会随着越南离岸流的摆动而南北移动, 北部的气旋涡由于没有出现类似南部的过渡模拟, 会呈现较强的气旋涡, 而南部的反气旋涡由于临近过渡模拟的气旋涡, 使得气候态平均不够显著。通过夏季海洋流场(见 2.1 节图 6)看出, 由于各年反气旋涡差异较大, 导致进行气候态平均时被弱化。因此 REDOS 的流场形态误差对本文关注区域的能量学诊断影响不大。本文着重探讨南海西部涡流相互作用的年际变化特征, 而海表面高度变化与环流之间存在显著相关(Zhuang *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014), 因而在进行数据比较时选用三个数据集的海表面高度, 除 REDOS 和 AVISO 外, 还引入 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model; <http://tds.hycom.org/thredds/dodsC/GLBu0.08>)的海表面高度资料进行对比。所用 HYCOM 数据时间跨度为 1992 年 10 月 2 日至 2010 年 12 月 31 日, 空间分辨率为  $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ , 时间分辨率为 1 天。在扣除三种数据气候态平均后, 分别在 NP 和 SP 区域计算海表面高度的月平均值, 得

到图 2。REDOS 与 AVISO 的海表面高度在 NP 和 SP 的相关系数分别为 0.84 和 0.73, HYCOM 与 AVISO 的海表面高度的相关系数分别为 0.74 和 0.40, 以上都通过 0.99 的信度检验。REDOS 与 AVISO 的海表面高度相关系数均优于 HYCOM 与 AVISO 的相关。同时, REDOS 与 AVISO 的逐月偏差小于 HYCOM 与 AVISO 的逐月偏差, 且都随着时间发展偏差逐渐缩小, 使得对于近年的数据可靠性更高。这可能与 REDOS 同化了大量南海航次现场观测资料有关。

通过逐年 6—9 月平均的夏季海洋上层流场可以看到(见 2.1 节图 6), 对于南部反气旋涡的模拟在季节尺度上较为可靠。另外, 通过 20 年 109.5°—114°E 纬向平均 6—9 月的涡度变化进一步来看(图略), 反气旋涡从六月中旬开始出现在 9°N 附近, 并在 7、8 月份逐渐向北移动并达到强盛, 与 9 月末衰减, 这也可以说明 REDOS 对南部反气旋涡的模拟情况是可以接受的。实际上 REDOS 对于反气旋涡的模拟并非没有体现, 而是受反气旋涡的分布不够稳定等导致其气候态平均场体现较弱, 但这对于我们本文用它来探讨涡流相互作用年际变化影响不大。并且 REDOS 与 AVISO 的逐月偏差小于 HYCOM 与 AVISO 的逐月偏差, 因此在本研究中, 我们采用 REDOS 数值产品。

REDOS 资料是由 CCMP(Cross—Calibrated, Multi—Platform)风场数据驱动的, 为保持一致, 本文

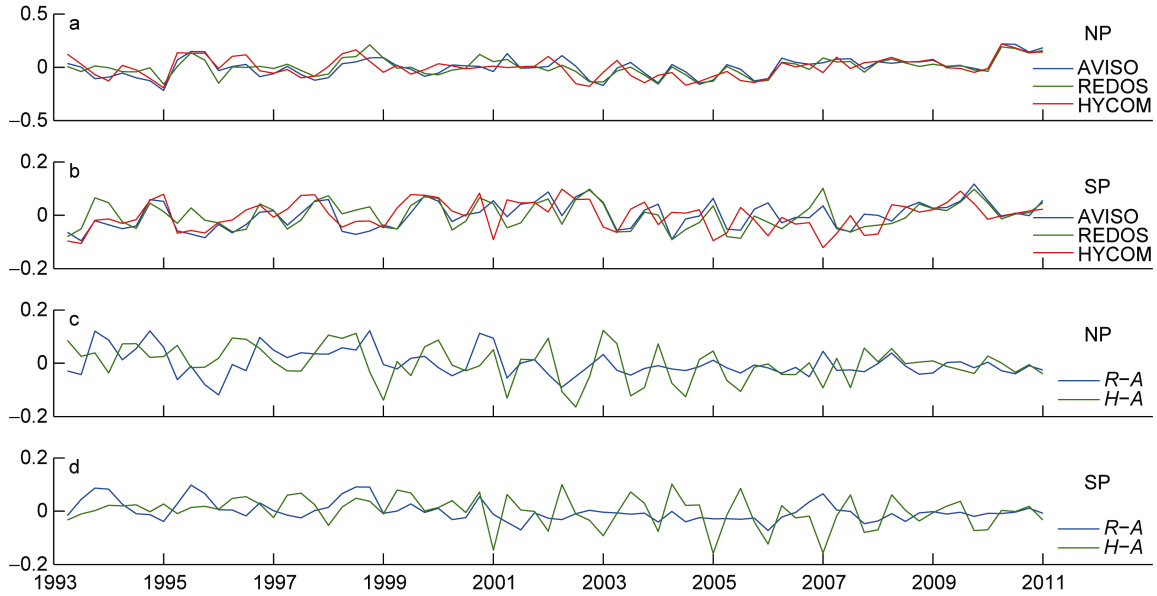


图 2 REDOS 与 AVISO 和 HYCOM 月平均海表面高度(单位: m)对比图

Fig.2 Comparison of REDOS monthly averaged sea surface height with AVISO and HYCOM

注: 图中 NP(North Pole)表示位于 110°—114°E, 11.5°—14.5°N 的北部气旋式涡旋, SP(South Pole)表示位于 110°—114°E, 7.5°—10.5°N 的南部反气旋式涡旋, 计算时分别扣除了不同数据间的系统差异, a 和 b 为 1993 至 2010 年每年 6—9 月份的所选区域月平均海表面高度, c 和 d 的 R-A 为同一时期的 REDOS 同 AVISO 的海表面高度差, H-A 为 HYCOM 同 AVISO 的海表面高度差

也采用 CCMP V2.0 的风场数据进行风应力做功诊断分析。时间跨度为 1992 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 天。

### 1.2 能量平衡诊断方程

能量学分析可以较好地展示涡流相互作用过程中的能量变化, 有助于深入的分析影响夏季南海西部环流的海洋内部因素, 本文主要从两个角度进行探讨: 通过正压不稳定和斜压不稳定过程, 平均流(越南离岸流)与涡动能(Eddy Kinetic Energy, EKE)和涡势能(Eddy available Potential Energy, EPE)进行能量交换, 以及涡动能通过正压不稳定、压强做功、风应力做功、平流做功和耗散项实现能量平衡。

单位质量的涡动能和涡势能定义如下(Böning *et al.*, 1992):

$$EKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2),$$

$$EPE = -\frac{g\tilde{\rho}'^2}{2\rho(\partial\rho_\theta/\partial z)}.$$

其中,  $u'=u-\bar{u}$ ,  $v'=v-\bar{v}$ ,  $u$  和  $v$  分别是纬向速度和经向速度,  $\bar{u}$  和  $\bar{v}$  分别是 1992 至 2011 年 6—9 月纬向速度和经向速度的气候态平均,  $g$  为重力加速度,  $\rho$  为海水密度,  $\tilde{\rho}'(x, y, z, t)=\rho(x, y, z, t)-\rho_b(z)$ ,  $\rho_b(z)$  为 1992 至 2011 年 6—9 月南海西部 108°—118°E,

8°—16°N 的时间平均和水平平均的背景场密度,  $\tilde{\rho}'=\tilde{\rho}-\bar{\tilde{\rho}}$  是同一区域  $\tilde{\rho}$  的时间平均,  $\bar{\rho}_\theta$  是位势密度的时间平均和水平平均。

四箱能量图可以描述平均动能、平均势能、涡动能和涡势能之间的能量转换(Böning *et al.*, 1992; Beckmann *et al.*, 1994), 并陆续应用于部分研究南海涡流相互作用的相关工作(Zhuang *et al.*, 2010; Zu *et al.*, 2013; Geng *et al.*, 2016)。在四箱能量图中, 用于分别代表势能和动能间涡流相互作用的  $T2$  项和  $T4$  项分别为:

$$T2 = -\frac{g}{-\rho\left(\frac{\partial\rho_\theta}{\partial z}\right)}\left(\frac{u'\tilde{\rho}'\partial\bar{\rho}}{\partial x} + \frac{v'\tilde{\rho}'\partial\bar{\rho}}{\partial y}\right),$$

$$T4 = -\left[\frac{u'u'\partial\bar{u}}{\partial x} + u'v'\left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right) + \frac{v'v'\partial\bar{v}}{\partial y}\right].$$

$T2$  项表示平均势能和涡势能之间的转换, 正值表示由于平均流和涡旋间的密度差异大, 造成斜压不稳定, 使平均势能向涡势能转换。 $T4$  项表示雷诺应力逆平均剪切的做功, 正值表示由于强的水平速度剪切造成正压不稳定, 平均动能向涡动能转换(Böning *et al.*, 1992)。需要说明的是,  $T2$  和  $T4$  的第一个负号表示能量传递的方向, 即平均能向涡能转化, 而  $T2$  分母上的负号与 EPE 的负号含义一致, 即垂直坐标轴向上为正方向。



EKE 可以有效地描述涡旋的变化, 对于夏季南海西部海域, 也是体现涡流相互作用的有效指标。因此本文还进行 EKE 能量平衡的计算分析, 方程如下 (Ivchenko *et al*, 1997; Geng *et al*, 2016):

$$\frac{\partial(\text{EKE})}{\partial t} = \text{WW} + \text{PW} + \text{T4} + \text{ADV} + \text{DIFF}$$

其中方程左侧为 EKE 随时间的变化项, WW 为风应力做功项:

$$\text{WW} = \frac{1}{\rho_0} (u' \tau x' + v' \tau y')$$

PW 为压强做功项:

$$\text{PW} = -\frac{1}{\rho_0} (u' \frac{\partial P'}{\partial x'} + v' \frac{\partial P'}{\partial y'})$$

ADV 为平流项:

$$\text{ADV} = -\left( u \frac{\partial \text{EKE}}{\partial x} + v \frac{\partial \text{EKE}}{\partial y} \right)$$

DIFF 为耗散项:

$$\text{DIFF} = u' \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial u'}{\partial z} \right) + u' F_x' + v' \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v'}{\partial z} \right) + v' F_y'$$

由于耗散项在 REDOS 数据中难以准确给出其耗

散系数, 而不同的耗散系数的选取会带来较大误差, 故本文着重考虑 WW、PW、T4 和 ADV 四项对 EKE 能量平衡的贡献。在计算过程中, 除 WW 项仅计算海表做功外, 其他各项做功均为 20—150m 深度积分后的垂向平均。取 150m 为最大深度是由于气候态平均的越南离岸流—的东向分量和北向分量主要影响 150m 以浅的区域(图 3), 150m 以深的变量迅速变小, 引入后可能会造成一定的误差。同时没有纳入 0—20m 之间的数据, 是由于本文计算的 EPE 和 T2 两项对垂向位势密度梯度  $\frac{\partial \rho_\theta}{\partial z}$  非常敏感, 而在部分海域  $\frac{\partial \rho_\theta}{\partial z}$  在 0—20m 极小, 且存在很大的噪音, 使得处于分母的  $\frac{\partial \rho_\theta}{\partial z}$  会导致 EPE 和 T2 在相邻的格点存在巨大差异, 远超其应有的量级, 而这一情况在 20m 以深基本消失。因此在后续计算过程中, 除只作用在海表的变量外, 其余各变量均采用这种方法进行计算。

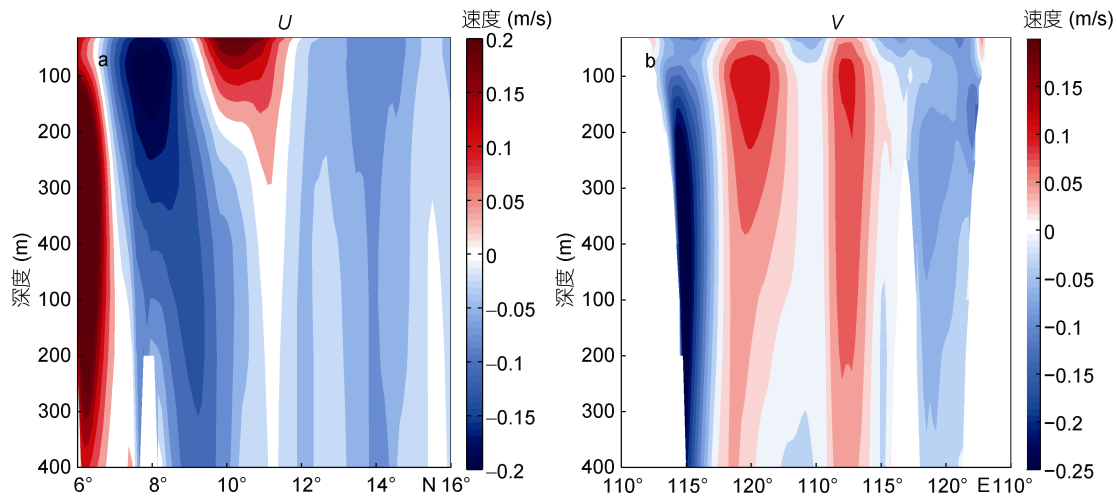


图 3 110°E 断面流场  $U$  分量和 11°N 断面流场  $V$  分量的气候态平均

Fig.3 Climatological average of  $U$  component of current along 110° E section and  $V$  component of current along 11° N section  
注: a 为流场的  $U$  分量, 以东为正; b 为  $V$  分量, 以北为正。单位均为 m/s

## 2 结果与分析

### 2.1 夏季流场的年际变化

图 4 为 1992 至 2011 年 6—9 月的气候态平均场平面图。从海表风场可以看到明显的夏季西南季风, 以及在安南山脉东南地区的强气旋式涡旋, 红色线表示风应力旋度为零的等值线, 分布在 10°—13°N 之间, 其南侧有较弱的反气旋式涡旋。图 4b 为 0—150m

深垂向积分后的平均流场及单位质量动能标准差, 在 11°N 以北存在显著的气旋式涡旋, 其南侧并没有显著的反气旋式涡旋, 这是由于该区域的涡流特征存在复杂的变化和波动, 气候态平均会抹平许多季节内的变化信息, 在 110°E, 7°N 附近出现的气旋式涡旋可能是过度模拟的结果(Quan *et al*, 2016), 但也呈现了近似的双涡结构和东向的离岸流。

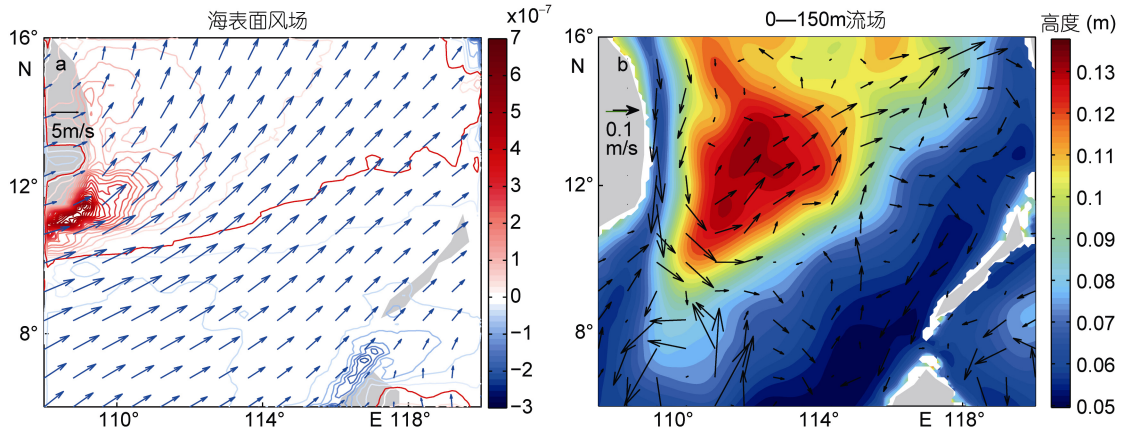


图 4 6—9 月海表面风场和上层流场气候态平均的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of climatological average for ocean surface wind and upper layer current from June to September  
注: a 为海表面风矢量及风应力旋度[单位为  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$ ], b 为 0—150 米垂向积分后平均流场及其单位质量动能标准差(单位为  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ), 红框所选区域为作为主要计算区域的  $109.5^\circ\text{—}114^\circ\text{E}, 9^\circ\text{—}14^\circ\text{N}$

标准差的大小有助于展现数值波动幅度最大的区域, 从图 4b 来看, 平均动能标准差主要分布在越南沿岸及东向离岸流附近, 据此可以选定具有代表性的计算区域, 即  $109.5^\circ\text{—}114^\circ\text{E}, 9^\circ\text{—}14^\circ\text{N}$ . 注意到这一区域纬向跨度较大, 正是越南离岸流轴线分布的不稳定, 使得涡流相互作用在这一区域活跃而复杂。

为客观描述流场的年际差异, 需制定分类标准, 不同于 Li 等(2014)仅计算  $U$  分量的方法, 本文根据  $U$

分量判断是否为东向流后计算单位质量的动能作为越南离岸流的强度指标。这是由于, 根据对 REDOS 逐日流场的查看, 越南离岸流并不是一支稳定的定常流, 其形态是在风应力旋度和涡流相互作用影响下频繁弯曲摆动的东向流。因而对于逐日流场而言, 其  $V$  分量可能会发生显著的变化, 但若只考虑  $U$  分量进行计算, 会丢失一部分动能信息, 导致计算产生误差。

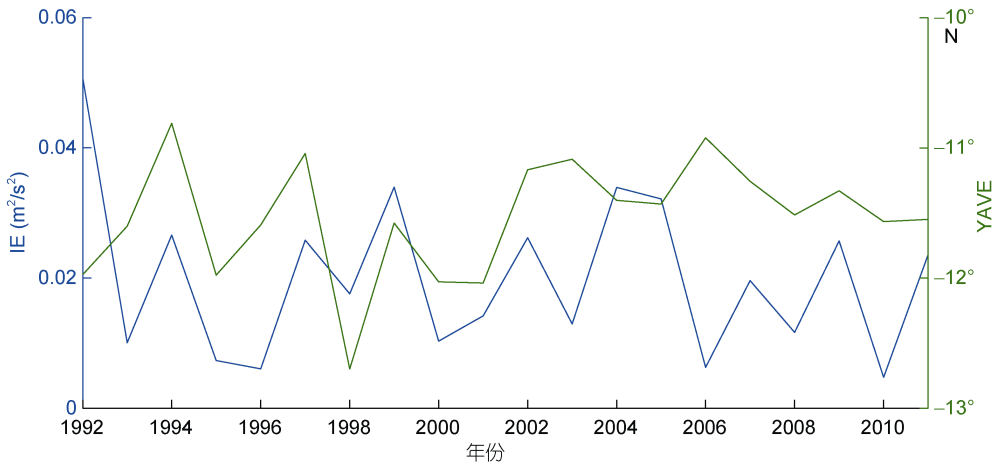


图 5 越南离岸流强度及纬度

Fig.5 Intensity and latitude of Vietnam Offshore Current  
注: 左侧坐标为越南离岸流的强度, 右侧为越南离岸流的平均纬度的相反数

根据图 4b 的空间分布, 选取  $109.5^\circ\text{—}114^\circ\text{E}, 9^\circ\text{—}14^\circ\text{N}$  区域海流进行垂向积分, 其中  $U$  分量为正的格点的动能平均值作为平均动能指数 IE, 动能最大位置对应的纬度平均值为 YAVE, 其余变量亦选择相同的计算区域。图 5 展示了不同年份越南离岸流的

强度及平均纬度, 考虑到计算指数的方案, 大值可能包含部分越南离岸流以外的东向流的动能, 以  $0.01\text{m}^2/\text{s}^2$  和  $0.02\text{m}^2/\text{s}^2$  为分界线, 大于  $0.02\text{m}^2/\text{s}^2$  为正异常, 小于  $0.01\text{m}^2/\text{s}^2$  为负异常, 二者之间为正常。在 Li 等(2014)文中 IE 与 YAVE 存在一定的负相关, 而在

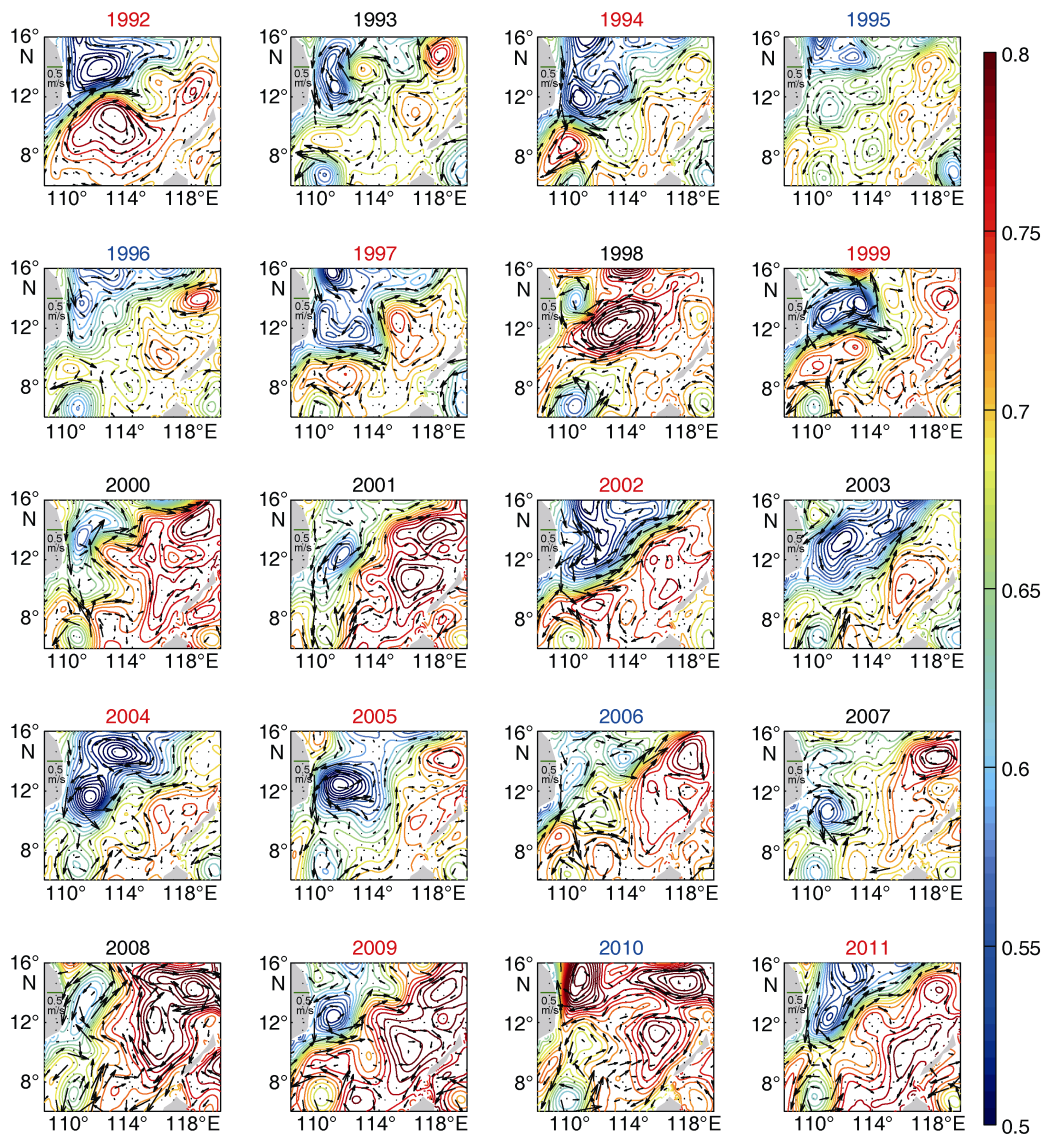


图6 1992—2011年每年6—9月海洋上层平均流场及海表面高度

Fig.6 Mean ocean upper layer current and sea surface height from June to September, 1992—2011

注: 图中正异常年标记为红色, 负异常年标记为蓝色, 正常年标记为黑色, 流场为0—150m垂向积分后平均, 陆地标识处的流场单位矢量长度为0.5m/s, 等值线单位为m, 图中没有画出未通过置信度为0.05的T检验的流场矢量

本文计算中则相关性较弱, 这可能是由三方面原因造成, 一是由于所使用的数据不同, 数据之间不同的初始条件、边界条件、插值和同化方案不同的情况下, 会带来完全不同的影响; 二是由于计算指数时使用的方案不同会造成一定差异; 三是由于本文计算采用0—150m垂向积分后的平均, 在流的大小和方向上都会与仅计算海表流场有所不同。与Quan等(2016)对夏季南海西边界流时的分类结果大体一致, 不同的是Quan等(2016)采用的判据为越南离岸流的纬度, 而以越南离岸流强度的大小作为分类标准。

利用上述分类方式, 正异常年为1992、1994、1997、1999、2002、2004、2005、2009和2011年, 负异常年为1995、1996、2006和2010年, 1993、1998、2000、2001、2003、2007和2008年为正常年。1992至2011年6—9月逐年平均流场分布如图6所示, 流场为0—150m的垂向积分后平均得到, 与海表流有所差异。在正异常年, 流场与涡旋, 尤其是气旋式涡旋结构强且清晰; 在正常年, 经向流显著, 气旋式涡旋依然较强; 在负异常年, 流场趋于混乱或呈现反位相分布的涡旋结构。



图 7 分别表示正异常、负异常和正常年的三种类型合成流场、SSH 和风场的空间分布特征。从流场来看, 正异常年整体流速大, 在越南东南沿海约  $11^{\circ}\text{N}$  开始向东流动, 并逐渐转向东北, 其北的气旋式涡旋强盛, 其南受南海西南的气旋式涡旋影响, 没有出现显著的反气旋式涡旋, 但对比正常年和负异常年仍

有强的反气旋趋势。负异常年整体流速小, 离岸流北部的气旋式涡旋很弱。正常年并非简单地介于正、负异常之间, 而是在形态上更接近负异常, 且经向流较强。由于分类标准并非纬向流的强弱, 而是东向流单位质量的动能, 说明仅凭借纬向流并不能完全反映越南离岸流的强弱, 将经向分量考虑进来是有必要的。

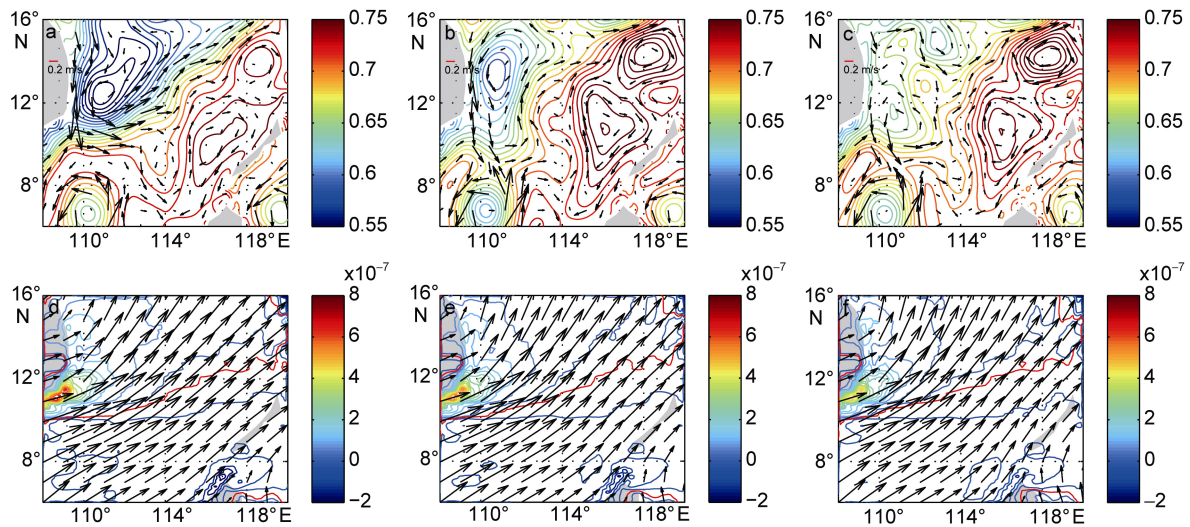


图 7 海表面风场、海洋上层环流、EKE 和 EPE 的年际差异

Fig.7 Interannual differences of sea surface wind, upper layer ocean current, EKE and EPE

注: 图中三列分别为正异常、正常和负异常年的平均空间分布。其中 a—c 为 SSH 和 0—150m 深积分后平均流场, 陆地标识的单位矢量大小为  $0.2\text{m/s}$ , SSH 单位为 m。d—f 为海表面风矢量和风应力旋度, 风应力旋度单位为  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$

图 7d、e、f 显示了风场在越南离岸流强弱年份间的差异, 从风向上看, 正异常年更偏西风, 而负异常年更偏南风; 从风应力旋度上看, 在越南东南沿岸始终呈现较集中的正的风应力旋度, 正异常年的强度大, 负异常年强度小, 正常年则介于两者之间。风应力旋度对夏季南海西部流场的影响已多有讨论, 主流观点认为安南山脉对南海夏季西南季风的阻挡使得在其西南部风速变大, 在风速最大值以北由于较大的风应力剪切, 出现强的正风应力旋度, 海表流场也趋于呈现气旋式涡旋, 产生的上升流使海表温度下降(Xie *et al.*, 2003)。对于三类情况, 风速的大小并没有明显差异, 推测其对海表流场的直接做功也差异较小, 海洋内部的涡流相互作用在不同年份的差异可能是导致的流场年际变化的另一个主要原因, 因此我们需要关注涡旋能量的空间分布、强弱及其变化。

## 2.2 四箱能量图分析

图 9a 和 10a 分别显示了 EPE 和 EKE 两种涡能的空间分布, 对比可以看出, EKE 强度略大于 EPE, 且在空间分布上, 也比 EPE 更广泛。具体而言, EKE 在

正异常年南北分散更小, 有向东延伸的趋势, 而负异常年则明显向南北两侧分散, 在  $11^{\circ}\text{N}$  附近达到极小值, 正常年则介于两者之间。注意到 EKE 在三种分类中强度变化不显著, 主要是空间分布的差异, 在越南离岸流强的年份, EKE 的分布也越向离岸流集中, 反之则在越南离岸流处很小, 这说明 EKE 的分布依赖于平均流的分布及其强度, 在平均流强的海域会产生更大强度的 EKE, 结合气候态平均和标准差的空间分布, 可知越南离岸流的强度影响其南北两侧的双涡结构。与 EKE 略有不同的是, 在不同年份, EPE 在强度和空间分布上均有一定差异, 在正异常年分, EPE 明显沿越南离岸流的流轴路径由越南东南沿岸向东北方向延伸, 负异常年则几乎呈经向分布, 沿南海西部沿岸向北延伸, 正常年则在强度和空间分布上都有所折中。相比较而言, EPE 对越南离岸流的路径依赖度很高, EKE 更多地依赖于海流本身的强度。

图 8b 和图 8d 所示为南海西部 EPE 的时间变化项  $dEPE$  与  $T2$  在空间分布和强度上高度对应, 说明 EPE 的变化主要受到斜压不稳定影响, 注意到几乎

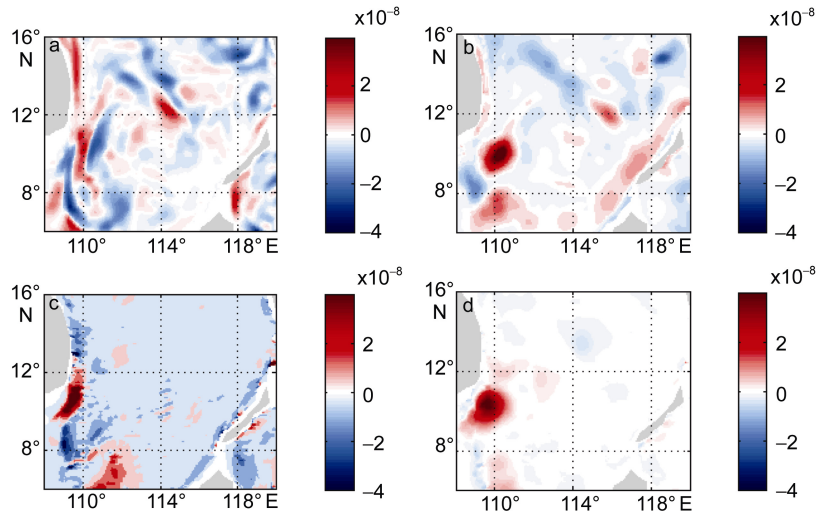


图 8 涡动能和涡势能时间变化, 正、斜压不稳定的平均空间分布

Fig. 8 Average spatial distribution of EKE(a) and EPE(b) changes with time, barotropic(c) and baroclinic(d) instability  
注: a—d 分别为涡动能的时间变化、涡势能的时间变化、正压不稳定和斜压不稳定, 单位均为  $m^2/s^3$

$T_2$  在主要区域均为正, 即能量从 MPE 向 EPE 转化, 且区域集中在越南东南沿岸。在越南离岸流流速最大的约  $110^\circ E, 11^\circ N$  附近,  $T_2$  达到极大值。根据公式,  $T_2$  主要变化项来自  $\frac{u'\bar{\rho}'\partial\bar{\rho}}{\partial x} + \frac{v'\bar{\rho}'\partial\bar{\rho}}{\partial y}$ ,  $\bar{\rho}$  在越南东南沿岸的水平梯度较大, 会放大局地扰动动量  $u'\bar{\rho}'$  和  $v'\bar{\rho}'$ 。Geng 等(2016)的试验表明, 对于独立运动的涡旋,  $T_2$  在涡旋与平均流靠近的一侧主要为正。在夏季南海西边界, 涡旋并不是孤立存在的, 而是依托于越南离岸流并随之变化。离岸流从岸界出发后分别向东、东北方向摆动, 速度扰动较大, 且由于上升流和涡旋的存

在, 密度扰动也较大, 故涡旋与平均流相互作用最显著的位置即越南东南沿岸, 使得其  $T_2$  达到正极值。由此可以基本解释夏季南海西部  $T_2$  的空间分布及其对 EPE 的影响。

从图 9 中可见, EPE 的强度和空间分布与  $T_2$  在不同年份十分吻合, 也说明了夏季南海西部势能间的涡流相互作用主要受斜压不稳定控制。越南离岸流强弱对斜压不稳定的强度影响较小, 但对其空间分布影响显著, 这是由于, 离岸流会与其邻近海域产生较大的密度差异, 进而产生围绕其流轴出现的较大的斜压不稳定, 使平均势能向涡势能转换。

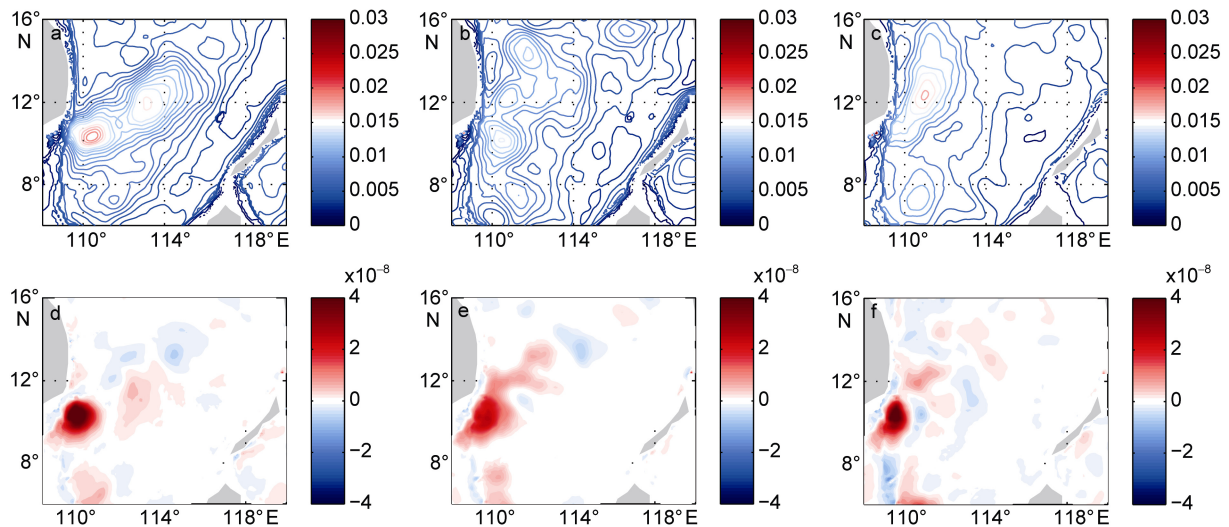


图 9 涡势能和斜压不稳定的年际差异

Fig. 9 Interannual differences of EPE and baroclinic instability  
注: 图中三列分别为 EPE 和  $T_2$  在正异常、正常和负异常年的空间分布, 其中 a—c 单位为  $m^2/s^2$ , d—f 单位为  $m^2/s^3$



$T_2$  是 EPE 变化的主要因素, 而图 8c 所示的  $T_4$  不能类似  $T_2$  进行对 EKE 解释, 这是因为如图 8 中,  $dEKE_t$  在南海西部都有较强分布, 而  $T_4$  的极值则主要分布在越南沿岸及其南向延伸区域, 在空间分布和强度上与  $dEKE_t$  都有显著差异。如图 10b 所示, 在不同年份下,  $T_4$  的空间分布和强度差异都不显著, 而图 10a 中 EKE 呈现出显著的年际变化, 说明由其他因

素在 EKE 的年际变化上起到主要作用。因此有必要进一步对 EKE 的年际变化进行能量平衡收支分析。

### 2.3 EKE 收支平衡分析

图 10 所示, PW 和 ADV 项的整体强度都大于 WW 和  $T_4$  项, 不同的是, PW 和 ADV 项呈密集的空间正负交替分布, 二者的空间变化说明压强和平流的做功对涡流相互作用的发展阶段是敏感的, 存在显著的天气尺度变化。

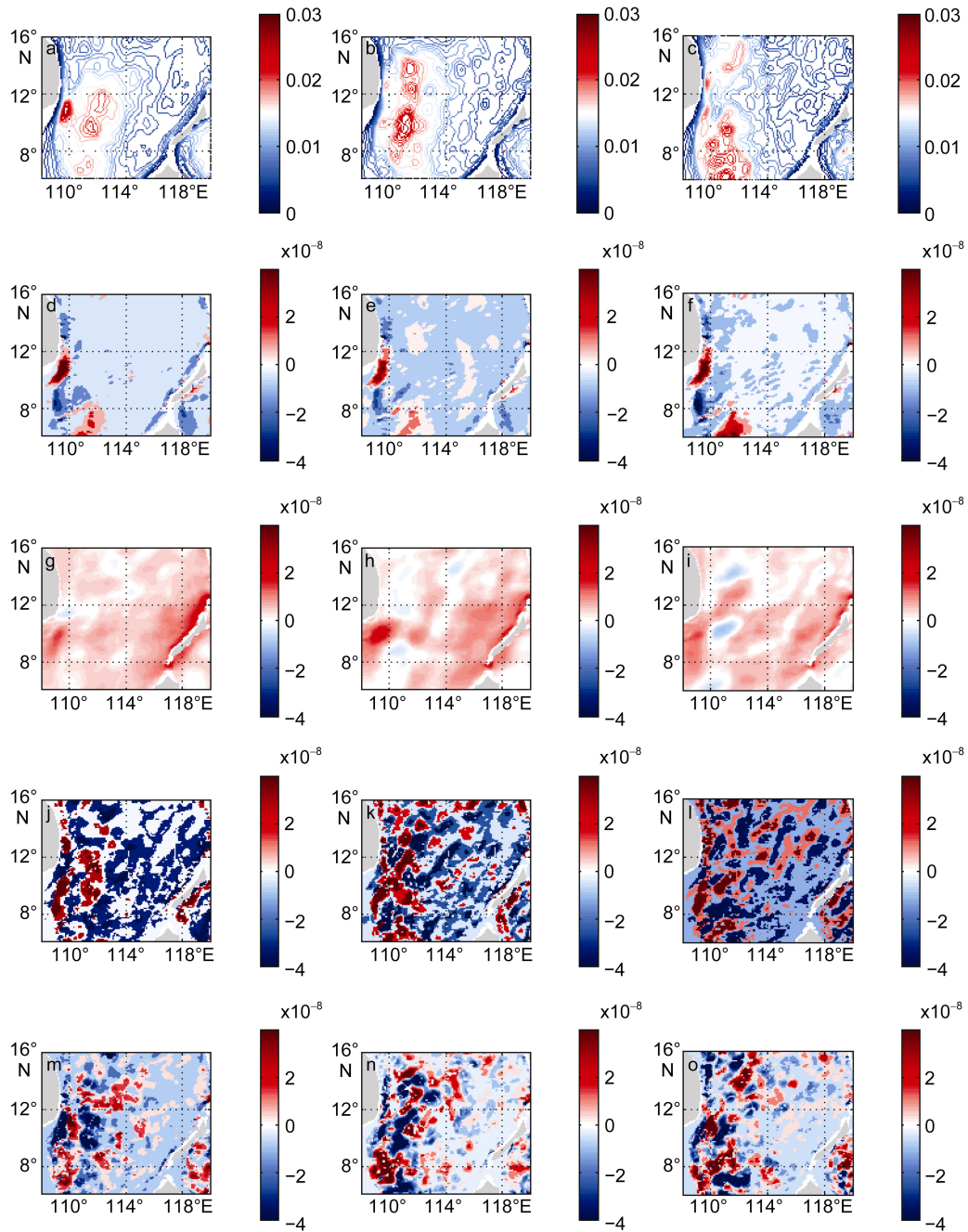


图 10 EKE 平衡各做功项的年际差异

Fig.10 Interannual differences of forcing terms in EKE balance

注: 图中三列分别为 EKE、 $T_4$ 、WW、PW 和 ADV 在正异常、正常和负异常年的空间分布, 其中 EKE 单位为  $m^2/s^2$ , 其余单位均为  $m^2/s^3$

$T4$  的极值部分主要沿南海西部沿岸分布, 对应  $T2$  的正极值位置处,  $T4$  始终为正极值, 且其南北两侧均为负极值。这说明在越南离岸流最强的位置通过正压不稳定, 能量从平均能向涡能转化, 而在涡旋远离流轴的位置, 涡动能向平均动能转化, 对比图 8b 可知, 局地风应力旋度的扰动也会通过增大上层环流水平剪切速度使正压不稳定增大。

而  $WW$  项主要呈正分布, 即对  $EKE$  的变化有一直具有正的贡献。 $WW$  在正异常年分正分布更广泛, 在负异常年, 离岸流南北两侧各有一部分负极值分布。从强度来看,  $WW$  在不同年份的正极值差异较小, 主要区别在于负极值的强度及分布。对于负异常年, 负极值之间的正值向东北延伸, 而正异常年和正常年, 负异常间的正值向东延伸, 这与风向和风应力旋度的分布类似。注意到对于负异常年份,  $WW$  的负(正)极值对应  $EKE$  极大(小)值区域, 这一现象在正异常和正常年也有所体现, 但相对影响范围更小, 这说明  $WW$  对越南离岸流较强时更利于涡旋的发展, 较弱时对其发展贡献变小, 甚至局地抑制发展。

$PW$  在空间分布上的差异并不显著, 但在强度上有明显差异: 在绘制相同等值线数量的情况下, 三幅图都达到了色标的极大、极小值, 而在正异常年分出现更多留白, 说明这些年份的绝对值和标准差更大, 且分布更为集中, 负异常年则相对较小, 正负分布则也更为均匀, 正常年介于两者之间, 这说明在正异常年,  $PW$  做功的强度和空间差异更大。这是由于正异常年的涡旋结构更强盛, 使得压强的扰动变大, 进而导致  $PW$  变大。

$ADV$  的分布与  $EKE$  分布类似, 在正异常年分布更趋于向越南离岸流靠拢, 在负异常年趋于向南北两侧分散, 在正常年则介于两者之间。更准确地, 是  $ADV$  的分布依赖于  $EKE$  强度的水平梯度, 这是由  $ADV$  公式决定的, 在  $EKE$  分布出现极值的区域, 由于  $EKE$  依赖于流速大小, 使得这些区域的流速较大, 因此通常  $ADV$  也会更显著。

总体而言, 从  $T4$ 、 $WW$ 、 $PW$  和  $ADV$  四项的绝对强度来看,  $PW$  是最主要的影响因素,  $ADV$  和  $WW$  次之,  $T4$  项最小。各项对于夏季南海西部的影响有所不同,  $PW$  和  $ADV$  空间变化大, 具有显著的扰动特征;  $WW$  主要做正功, 总体而言是  $EKE$  能量的稳定来源之一;  $T4$  的贡献主要在南海西部沿岸, 空间分布稳定, 即在岸界的正压不稳定很强, 这是由于这一区域的地形由大陆坡变为大陆架, 使得两区块水体交接处

的水平速度剪切很大, 而在速度最强的  $10^{\circ}$ — $12^{\circ}N$  是越南离岸流的主要离岸纬度, 速度剪切最大, 是岸界能量从平均动能向涡动能转化的主要区域。

通过选定合适的区域( $109.5^{\circ}$ — $114^{\circ}E$ ,  $9^{\circ}$ — $14^{\circ}N$ , 深度为  $20$ — $150m$ ), 观察  $EKE$  平衡在不同年份间的差异(表 1)。由于  $EKE$  平衡方程依赖于区域守恒, 而南海西部海域是一个侧边界和三个开边界条件, 本身难以精确满足封闭的守恒条件, 计算过程中也没有考虑本身量级较大的摩擦项, 再加上局地涡旋的水平运动对能量本身产生净差异, 故实际计算结果存在较大的偏差。尽管如此, 仍可通过  $EKE$  平衡各变量的相对变化探讨  $EKE$  的演变机制。

表 1  $EKE$  平衡方程各项统计(单位:  $10^{-5}m^2/s^3$ )  
Tab.1 Statistics of terms in  $EKE$  balance equation (in  $10^{-5}m^2/s^3$ )

$10^{-5}m^2/s^3$ 项目	正异常	正常	负异常
dEKEt	7.86	3.99	0.75
SUM	70.4	-1.16	86.6
$T4$	6.21	0.90	-0.18
$WW$	27.6	26.30	24.7
$PW$	55.9	17.20	52.4
$ADV$	-18.9	-45.50	9.72
$DIFF$	-62.5	2.83	-85.8

表 1 所示为各分类年的时间平均,  $dEKEt$  在正异常年最大, 负异常年最小, 这与图 10a 的空间分布结果一致, 说明越南离岸流的通过涡流相互作用显著影响涡旋强度。计算总和  $SUM$  与  $dEKEt$  相差  $1$ — $2$  个量级, 这是由多方面原因造成的, 前文已有讨论。 $T4$  和  $WW$  在正异常年最强, 负异常年最弱, 说明正压不稳定与风场扰动可能存在一定的正相关, 且二者均为正, 整体对  $EKE$  的发展做正功。由于  $T4$  高值区主要分布在越南东南沿海, 使得整体平均量级较小。由于  $PW$  和  $ADV$  正负交替的空间分布特征, 计算值对选取空间十分敏感, 故在此只作量级上的讨论,  $PW$  基本为四项中的最大项,  $ADV$  则在量级上与  $WW$  相近。

$ADV$  在正常年较为特殊, 为了解释这一现象, 对合成正常年的各年进行逐一查看, 发现在 1993 年 8 月 5 日至 8 月 13 日, 1998 年 7 月 22 日至 8 月 10 日, 和 2001 年 7 月 27 日至 8 月 20 日, 这些日期在  $ADV$  出现极值的海域都有两个特征, 即存在一对相互邻近的气旋式涡旋和反气旋式涡旋, 且二者相接处海流速度梯度大。根据  $ADV$  的公式, 对于具有明显流轴的海流, 速度大的区域以东或以北  $EKE$  的水平梯度

为负,若此时海流的经向分量或纬向分量需至少有一个在笛卡尔坐标下是负值,便可导致 ADV 为负。而 1993、1998 和 2001 指定日期期间的 ADV 负极值区域都满足以上条件,故会出现负极值,使得平流效应的影响变大。故 ADV 在正常年份由于天气尺度过程造成结果引入较大的负误差。

将  $dEKE_t$  减去 SUM 得到 DIFF,可见方程中忽略的耗散项量级较大,与 PW 相当,对 EKE 平衡具有显著影响,这与 Geng 等(2016)的结论一致,可见耗散项对 EKE 平衡也具有重要作用。

### 3 讨论

本文与 Quan 等(2016)都发现的夏季南海西南部稳定存在的气旋式涡旋,在 AVISO 资料中则并未发现较强且稳定的气旋式涡旋,可见 REDOS 本身也存在一定的不确定性。基于这一点,本文通过选取区域而非跟踪流场的方式进行计算,这可避免因可能存在的流场偏差而导致的结果错误。其中最关键的是刻画越南离岸流强度的指标选取。南海西部海域在夏季的流场特征与冬季的稳定南向流有显著差异,夏季流场波动显著,平均流相比冬季更弱,虽然其气候态平均流主要向东,但具体的短时流场情况有所不同,其经向分量量级也很显著,所以在制定刻画离岸流强度的指标时,取纬向分量为正的位置计算其单位质量的动能,更能反映其真实的平均动能。

关于南海 EKE 的空间分布、变化特征和主要能量来源已有若干讨论(He *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2009; Xiu *et al.*, 2010; Zhuang *et al.*, 2010)。He 等(2002)指出夏季越南东南海域的 EKE 高值区是由越南离岸流的轴线不稳定造成的,轴线的波动会与两侧的涡旋进行强烈的涡流相互作用,对 EKE 的演变提供能量。Chen 等(2009)则认为夏季越南离岸流的斜压不稳定可能会增强夏季 EKE,但由于冬季强的西边界流对应的 EKE 强度较弱,故平均流的斜压不稳定并不是 EKE 季节变化的主要因素。Xiu 等(2010)进一步指出,除了风应力和风应力旋度外,背景流场的不稳定、罗斯贝波的不稳定都会对涡旋的成长产生影响。这些都说明,影响 EKE 的因素较为复杂,风的驱动、海洋内部的涡流相互作用和波动的不稳定都会影响涡旋的演变过程,而本文通过定量的 EKE 平衡诊断分析,证明了这一点。

本文对年际变化中的正异常、负异常年进行区分的标准与 Quan 等(2016)不同,这是因为本文主要从

能量转换的角度进行探讨,而非单纯地通过流场形态进行区分,故分类结果略有差异。从 Geng 等(2016)对单个涡旋的涡流相互作用试验结果来看,正、斜压不稳定在涡旋与强流相互作用的不同阶段量级差异极大,对与本文而言,由于所选区域可能同时包含若干涡旋的不同生命阶段,故计算整体的强度时的量级要略小于 PW、WW 和 ADV 项,计算的  $dEKE_t$  与 SUM 之差实际上并非仅仅包含公式中的 DIFF 项,还包含许多适用条件、数据同化、区域选择、天气尺度影响等的误差,所以在正常年份,会出现 DIFF 为正的情况,并非代表耗散项做正功。这些恰恰说明海洋中涡流相互作用的过程是十分复杂多变、难以精准刻画的。

本文还利用 1991—2011 年每连续四个月的 Nino3.4 和 IOD 指数平均值与 IE 进行相关性分析,结果显示,IE 与二者的同步与滞后相关性均较小,绝对值最大约为-0.35,且仅通过 85%的信度检验。这与 Li 等(2014)、Quan 等(2016)等的结果不同,这可能是由于前人对于越南离岸流的标准是东向流的大小,而本文考虑了纬向分量,故会使得风应力旋度在越南离岸流的强度中的作用受到影响,进而使得 ENSO 和 IOD 等通过风场路径影响的 IE 的相关性较小。

另外,由于本文所使用的海洋资料没有包含垂向各变量,使得各计算主要为水平分量,Geng 等(2016)的计算结果表明,垂向分量对涡流相互作用具有重要贡献,涡旋在演变过程中,涡动能在上层由平均动能提供,在逐渐向下传递的过程中,涡势能的作用逐渐凸显,转化为涡动能以维持在次表层的涡旋强度,使得涡旋从上层向下扩展,在这一过程中的垂向分量具有重要意义,可见考虑垂向变量有利于完善上层环流的整体能量学分析。

### 4 结论

本文利用 1992 至 2011 年 6—9 月的南海海洋再分析产品 REDOS 和风场资料 CCMP,探讨了夏季南海西部涡流相互作用的年际变化特征,从能量学角度分析平均能与涡能之间的相互转化,并以涡动能为代表探讨影响其变化的各做功项的年际变化及影响,主要结论如下:

(1) 越南离岸流主要在  $11^{\circ}$ — $12^{\circ}$ N 附近波动,根据越南离岸流强度进行分类,可知正异常年,越南离岸流及双涡结构加强;负异常年,越南离岸流极大减弱,双涡结构不显著。EKE 极值主要沿越南离岸流分

布, 在正异常年向东延伸, 在负异常年向北延伸; EPE 极值在正异常年集中在  $12^{\circ}\text{N}$  附近, 负异常年向南北分散。

(2) EKE 在三种分类下的强度变化很小, 而 EPE 的强度则在正(负)异常年有一定增强(减弱)。EKE 的大小依赖于流速大小和由风应力旋度扰动造成的上层水平流速剪切。EPE 强度相对较小, 越南离岸流影响周围海域的速度和密度分布, 造成的斜压不稳定是导致 EPE 极值主要沿越南离岸流分布的主要原因。正压不稳定对海底地形较为敏感, 在南海西部沿岸是 EKE 的主要变化因子, 但其以东海域, 正压不稳定迅速减小, 风应力做功、压强做功和平流项成为解释 EKE 变化的主要因素。

(3) 通过 EKE 平衡分析得到, 在时间变化上, 压强做功起最主要的贡献, 风应力和平流次之, 正压不稳定由于主要分布在沿海地区, 区域整体贡献最小; 在空间变化上, 风应力和平流起主导作用, 压强做功和正压不稳定的影响较弱; 摩擦耗散对 EKE 平衡具有重要作用。

### 参 考 文 献

- 王东晓, 刘钦燕, 谢 强等, 2013. 与南海西边界流有关的区域海洋学进展. 科学通报, 58(14): 1277—1288
- Bayler E J, Liu Z Y, 2008. Basin-scale wind-forced dynamics of the seasonal southern South China Sea gyre. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7): C07014
- Beckmann A, Böning C W, Brüggge B *et al*, 1994. On the generation and role of eddy variability in the central North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C10): 20381—20391
- Böning C W, Budich R G, 1992. Eddy dynamics in a primitive equation model: Sensitivity to horizontal resolution and friction. *Journal of Physical Oceanography*, 22(4): 361—381
- Cai S Q, Long X M, Wang S G, 2007. A model study of the summer Southeast Vietnam offshore current in the southern South China Sea. *Continental Shelf Research*, 27(18): 2357—2372
- 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
- Chu X Q, Dong C M, Qi Y Q, 2017. The influence of ENSO on an oceanic eddy pair in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(3): 1643—1652, doi: 10.1002/2016JC012642
- Fang G, Fang W, Fang Y *et al*, 1998. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 37(1): 1—16
- Gan J P, Qu T D, 2008. Coastal jet separation and associated flow variability in the southwest South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, 55(1): 1—19
- Geng W, Xie Q, Chen G X *et al*, 2016. Numerical study on the eddy-mean flow interaction between a cyclonic eddy and Kuroshio. *Journal of Oceanography*, 72(5): 727—745
- He Z G, Wang D X, Hu J Y, 2002. Features of eddy kinetic energy and variations of upper circulation in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 21(2): 305—314
- Hu J, Kawamura H, Hong H *et al*, 2000. A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion. *Journal of Oceanography*, 56(6): 607—624
- Ivchenko V O, Tréguier A M, Best S E, 1997. A kinetic energy budget and internal instabilities in the fine resolution Antarctic model. *Journal of Physical Oceanography*, 27(1): 5—22
- Li Y L, Han W Q, Wilkin J L *et al*, 2014. Interannual variability of the surface summertime eastward jet in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(10): 7205—7228
- Quan Q, Xue H J, Qin H L *et al*, 2016. Features and variability of the South China Sea western boundary current from 1992 to 2011. *Ocean Dynamics*, 66(6—7): 795—810
- Wang G H, Chen D K, Su J L, 2006. Generation and life cycle of the dipole in the South China Sea summer circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C6): C06002
- Wyrtki K, 1961. *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters*. In: Naga Report 2. Scripps Institution of Oceanography. San Diego, USA: NAGA, 195
- Xiang R, Fang W D, Zhou S Q, 2016. The anticyclonic circulation in the southern South China Sea: observed structure, seasonal development and interannual variability. *Journal of Marine Systems*, 154: 131—145
- Xie S P, Xie Q, Wang D X *et al*, 2003. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C8): 3261
- 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*, 115(C3): C03012
- Xu H, Xie S P, Wang Y *et al*, 2008. Orographic effects on South China Sea summer climate. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100(1): 275—289
- Yang H Y, Wu L X, Liu H L *et al*, 2013. Eddy energy sources and sinks in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9): 4716—4726
- Zeng L L, Du Y, Xie S P *et al*, 2009. Barrier layer in the South China Sea during summer 2000. *Dynamics of Atmospheres*

- and Oceans, 47(1—3): 38—54
- Zeng L L, Liu W T, Xue H J *et al*, 2014b. Freshening in the South China Sea during 2012 revealed by Aquarius and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12): 8296—8314
- Zeng L L, Wang Q, Xie Q *et al*, 2015. Hydrographic field investigations in the Northern South China Sea by open cruises during 2004—2013. *Science Bulletin*, 60(6): 607—615
- Zeng L L, Wang D X, 2017. Seasonal variations in the barrier layer in the South China Sea: characteristics, mechanisms and impact of warming. *Climate Dynamics*, 48(5—6): 1911—1930, doi: 10.1007/s00382-016-3182-8
- Zeng L L, Wang D X, Chen J *et al*, 2016a. SCSPD14, a South China Sea physical oceanographic dataset derived from *in situ* measurements during 1919—2014. *Scientific Data*, 3: 160029, doi: 10.1038/sdata.2016.29
- Zeng L L, Wang D X, Xiu P *et al*, 2016b. Decadal variation and trends in subsurface salinity from 1960 to 2012 in the northern South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 43(23): 12181—12189
- Zeng X Z, Peng S Q, Li Z J *et al*, 2014a. A reanalysis dataset of the South China Sea. *Scientific Data*, 1: 140052
- Zhao H, Tang D L, 2007. Effect of 1998 El Niño on the distribution of phytoplankton in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C2): C02017
- Zhuang W, Xie S P, Wang D X *et al*, 2010. Intraseasonal variability in sea surface height over the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4): C04010
- Zu T T, Wang D X, Yan C X *et al*, 2013. Evolution of an anticyclonic eddy southwest of Taiwan. *Ocean Dynamics*, 63(5): 519—531

## CHARACTERISTICS OF EDDY-MEAN FLOW INTERACTION IN THE OFFSHORE CURRENT AREA OF WESTERN SOUTH CHINA SEA

LI Han<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, HUANG Ke<sup>1</sup>, LIU Qin-Yan<sup>1</sup>, TILAK Priyadarshana<sup>3</sup>,  
GUAN Yu-Ping<sup>1</sup> WANG Dong-Xiao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Faculty of Fisheries and Marine Sciences & Technology University of Ruhuna, Matara, Sri Lanka)

**Abstract** In the view of energy, the interannual variability of eddy-mean flow interaction around the Vietnam Offshore Current (VOC) in summer (June-September) from 1992 to 2011 was investigated by use of the REDOS (Reanalysis Dataset of the South China Sea) and the CCMP (Cross-Calibrated, Multi-Platform) ocean surface wind. The relative importance of wind stress, pressure gradient, barotropic instability, and advection were analyzed in energy budget. Three types of years during 1992—2011 could be recognized relative to the VOC intensity: positive KE anomaly years, negative KE anomaly years, and normal years. Results show that in the positive KE anomalous years, the peak of Eddy Kinetic Energy (EKE) and the Eddy available Potential Energy (EPE) are mainly distributed along the VOC; in the negative KE anomalous years, the peak of EKE dispersed to the north and south sides, with a northward EPE extension; in the normal years, the spatial distributions of peak EKE and EPE range between the positive and negative KE anomalies. The baroclinic instability is the main reason of the EPE interannual variability. The VOC affects the distributions of velocity and density of surrounding areas, and hence results in the baroclinic instability. However, factors are quite complicated for EKE interannual change, of which pressure work is the most important factor, wind stress work and advection are the secondary, and the barotropic instability is the least. The barotropic instability depends on the velocity of flow and the upper horizontal velocity shear caused by wind stress curl disturbance.

**Key words** Vietnam Offshore Current; energy budget; eddy-flow interaction; interannual variability