

邹玮,徐峰,涂石飞,等.南海近海面风场变化特征及其与 ENSO 的相关性研究[J].海洋气象学报,2018,38(3):83-91.  
Zou Wei, Xu Feng, Tu Shifei, et al. Study on the variation characteristics of near-surface wind field over the South China Sea and its correlation with ENSO [J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(3): 83-91. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.010. (in Chinese)

## 南海近海面风场变化特征及其与 ENSO 的相关性研究

邹玮<sup>1,3</sup>, 徐峰<sup>1,2</sup>, 涂石飞<sup>1,2</sup>, 张馨文<sup>1</sup>, 季倩倩<sup>1</sup>, 陈思奇<sup>1</sup>, 张羽<sup>4</sup>

(1. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088; 2. 南海海洋气象研究院, 广东 湛江 524088; 3. 南京大学大气科学学院, 江苏 南京 210023; 4. 广东省气候中心, 广东 广州 510640)

**摘要:** 利用 1979—2017 年共 39 a 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 海表面 10 m 风场资料, 采用经验正交函数方法 (EOF)、小波时频特征分析等方法分析了南海近海面风场变化特征及其对 ENSO 的响应。结果表明: 南海近海面风场第一模态海表面平均风速呈减小趋势, 呈现年代际变化, 且与 ENSO 相关, 但相关性在 1990 年后趋于减小; 第二模态中南海北部和南部平均风速呈减小趋势, 中部增大; 第三模态中南海中部海表面平均风速趋于减小, 北部和南部增大, 第二和第三模态均表现为年际变化, 且均与 ENSO 显著相关, 近年来 ENSO 与第三模态的相关性逐渐增强。春季南海表面平均风速从南到北逐渐增加; 夏季在越南沿岸部分海域仍有一个风速极大值中心, 从该海域向四周逐渐减小, 整片海域风向均是西南风; 秋季由南向北依次增加; 冬季南海整片海域风速都较大, 越南沿岸和我国东沙群岛海域存在两个极大值中心。

**关键词:** 中国南海; 近海面风场; ENSO; EOF 分析; 小波分析

**中图分类号:** P732.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)03-0083-09

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.010

## Study on the variation characteristics of near-surface wind field over the South China Sea and its correlation with ENSO

ZOU Wei<sup>1,3</sup>, XU Feng<sup>1,2</sup>, TU Shifei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinwen<sup>1</sup>, JI Qianqian<sup>1</sup>, CHEN Siqi<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>4</sup>

(1. College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. South China Sea Institute of Marine Meteorology, Zhanjiang 524088, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Guangdong Climate Center, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** Based on the data of sea surface wind field at 10 m from ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) from 1979 to 2017, the Empirical Orthogonal Function (EOF) method and wavelet time-frequency analysis are used to analyze the variation characteristics of near-surface wind field over the South China Sea and its response to ENSO. The results are as follows. For the first EOF mode of the near-surface wind field over the South China Sea, the average sea surface wind speed presents downtrend and interdecadal variations and is correlated with ENSO, but the correlation gradually decreases since 1990. For the second EOF mode, the average wind speed shows downtrend over the northern and southern South China Sea and uptrend over the central South China Sea. For the third

收稿日期: 2018-06-25; 修订日期: 2018-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41475120); 2016 年广东省大学生创新项目; 广东省自然科学基金重大基础研究培育项目 (2015A030308014)

作者简介: 邹玮, 女, 硕士研究生, 主要从事海洋气象、气候分析等研究, were\_mercy@163.com。

通信作者: 徐峰, 男, 博士, 教授, 主要从事大气物理学与大气环境、海洋气象等研究, gdouxufeng@126.com。

EOF mode, the average sea surface wind speed gradually decreases over the central South China Sea and increases over the northern and southern South China Sea. Interdecadal variations are manifested in the second and third mode and are significantly correlated with ENSO. Recent years have witnessed the correlation increase between ENSO and the third mode. In spring, the average sea surface wind speed over the South China Sea gradually increases from south to north. In summer, there is a center of maximum wind speed over some sea areas of the coast of Vietnam, while the speed gradually decreases from these sea areas to the surrounding areas. Southwesterly winds prevail over these sea areas. In autumn, the speed successively increases from south to north. In winter, the wind speed is relatively large over the whole South China Sea, and there are two centers of maximum speed over the coast of Vietnam and the sea areas of Dongsha Islands.

**Key words** the South China Sea; near-surface wind field; ENSO; EOF analysis; wavelet time-frequency analysis

## 引言

风是气象预报的必要参数,大致可以分为陆地风和海风。海表面风场与海洋上层的运动息息相关,在海洋动力学过程中,海面风场驱动了海面波浪的形成以及区域和全球性的海洋环流<sup>[1]</sup>,近海面风场的变化直接影响着沿岸居民的生活及海上作业。南海是世界第三大陆缘海,其海域辽阔,水体巨大,水域深渊。随着我国对海洋的高度重视,对南海气候变化的研究也在不断深入,因此探讨南海近海面风场的时空分布特征及其变化有着十分重要的意义。我国气候变化是多种因素相互作用的结果<sup>[2]</sup>。ENSO事件受到海气相互作用的影响<sup>[3]</sup>,是气象要素异常变化的主要原因<sup>[4]</sup>,也是当前最重要的一种海气相互作用的气候变化现象。ENSO冷暖相位变换,对太平洋及其周边地区的气候特征变化具有较大影响,前人研究表明,ENSO通过影响大气环流进而产生气候变化<sup>[5]</sup>。南海作为太平洋西边缘海之一,研究其风场变化与ENSO循环的相互关系显得尤为重要。

王静等<sup>[6]</sup>利用T/P(TOPEX/Poseidon)卫星高度计反演的约59个月海表风速,采用经验正交函数(EOF)方法分析了南海海表风场。沈春等<sup>[7]</sup>研究发现南海海面原始风场风速季节变化最为明显,且EOF结果进一步表明:原始风场第三模态及异常风场第二模态时间变化函数与南方涛动指数(SOI)和太平洋年代际涛动指数(PDO)呈弱相关。齐义泉和施平<sup>[8]</sup>指出南海风场全年月平均风速分布特征为东北季风期较大、冬季风向夏季风转换的时期较小。Xie et al.<sup>[9]</sup>研究了ENSO对南印度洋海表温度

的影响,分析得出El Niño是南印度洋温跃层异常变化的主要原因,而海温的变化引起了风场异常反馈。Wang<sup>[10]</sup>利用NCEP/NCAR再分析场和NCEP海表温度(SST)对1950—1999年的ENSO和大气环流进行了描述和检验,结果表明,太平洋纬向环流的变化与海表面温度异常有关。

综上所述,学者针对南海近海面风场做了较为系统的研究,但以往的研究时间跨度较短,数据资料空间分辨率较低,且仅以风速标量值为统计对象,对于风场经纬向分量长期趋势研究相对较少。同时,关于南海风场对ENSO等大尺度海气系统的响应研究还有一定的局限性。因此,基于近39 a欧洲中心再分析资料,选取具有长时间序列以及高分辨率的南海风场数据进行处理,研究风速和 $u$ 、 $v$ 分量的长期特征,详细对比南海冬夏季风场差异,并利用小波分析等方法,探讨了南海风场不同模态的时频特征及其与ENSO的相关性。

## 1 资料与研究区域

采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA-Interim 10 m风场资料,所用变量为纬向风场矢量 $u$ 、经向风场矢量 $v$ 以及海表面月平均风速分布。资料空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,研究时间序列长度为39 a(1979—2017年)。

研究区域为中国南海( $3.125^\circ \text{S} \sim 23.125^\circ \text{N}$ ,  $97.875^\circ \text{E} \sim 122.125^\circ \text{E}$ )。有学者分析得出Nino3.4指数能更好地描述ENSO现象<sup>[11]</sup>,参照美国国家气候中心(CPC)选取Nino3.4区( $170^\circ \text{W} \sim 120^\circ \text{W}$ ,  $5^\circ \text{N} \sim 5^\circ \text{S}$ )的平均海表面温度(SST)表征ENSO变化的指标。

## 2 南海风场的时空特征

### 2.1 南海风场变化特征

南海海表面风速标量减去 39 a 的平均风场得到月平均风速距平,对其作 EOF 分解得第一模态的方差贡献率为 45.44%,第二模态为 16.26%,第三模态为 5.06%,前三个模态累计方差贡献率为 66.76%,表明前三个模态基本上能概括南海近海面风场的时空分布特征。

由第一模态的特征向量场(图 1a)分析得出,整个南海海域量值皆为正值,即海表面平均风速同位相变化,且变幅最大值出现在南沙群岛西北部,由此呈扩散状向四周减小。该结论与前人所作结果<sup>[12]</sup>表现一致。图 2a 为平滑后第一模态风场空间分布对应的时间函数,其中空间第一模态对应的时间权重系数总体上在减小,表明海表面平均风速呈减小趋势。南海近海面风场第二模态的特征向量场(图 1b)揭示出南海北部和中部平均风速的量值

呈现“跷跷板”式反位相分布,负值最大中心在南海西北部和北部,在南海南部少数海域量值为负值,但是变幅较小。正值最大中心在南沙群岛附近海域。第二模态对应的时间系数(图 2b)在 2007 年后缓慢波动上升,揭示出南海北部和南部平均风速呈减小趋势,中部增大。1991—1994 年、1997—1998 年、2009—2010 年为厄尔尼诺年<sup>[13]</sup>,这几年南海海平面平均风速均呈现反位相变动,该结果表明,南海风场的变化可能和 ENSO 事件有关。分析南海风场的 EOF 第三模态(图 1c)得出结论:南海中部海域平均风速的变化与南海南部和北部海域表现出反位相分布。从量值上看,南海表面风场变化有两个正值中心,一个在北部湾附近,一个在马来西亚沿岸,前者的量值相对后者更大。有两个负值中心,一个在南海南部,一个在西沙群岛附近,前者的量值相对后者更大。第三模态时间系数(图 2c)呈缓慢下滑趋势,表示南海中部海表面平均风速趋于减小,北部和南部增大。

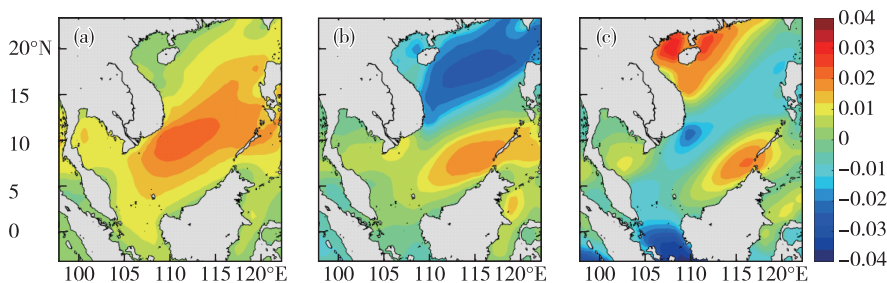


图 1 南海月平均风速距平 EOF 分解前三个特征向量空间分布(a.第一模态,b.第二模态,c.第三模态)

Fig.1 Spatial distribution of the first three eigenvectors obtained by EOF decomposition of monthly mean wind speed anomaly over the South China Sea (a. the first mode, b. the second mode, c. the third mode)

### 2.2 $u$ 、 $v$ 分量变化特征

考虑到风场是一个矢量场,而原始风场风速仅能表示风的大小,不能表示风向,因此本文基于  $u$ 、 $v$  的 EOF 结果来判断平均风向。定义风矢量经向向北为正,纬向向东为正。

南海近海面纬向风场的第一模态空间分布(图 3a)表现为北部少数区域量值为正,中部及南部量值为负,且负值极大中心出现在南沙群岛。经向风场量值(图 3b)除了在苏禄海南部海域呈现正值以外,在大部分海域呈现负值。2012—2017 年年纬向风场第一模态时间系数(图 4a)呈正值,经向风场(图 4d)呈负值,表明该时间段内南海北部海域风向大致为西南向,中部和南部为东南向。

由南海近海面纬向风场 EOF 分析的第二模态(图 3c)可知,南海北部纬向平均风速量值为正,且

变幅较大,存在一个舌状高量值区域,而南部量值为负,且变幅较小;由经向风场(图 3d)得到南海北部量值为负,中部和南部为正。对应其时间系数,纬向风场(图 4b)在 2012 年后时间系数为正值,经向风场(图 4e)为负值,揭示了该时期南海北部海域风向大致为西南向,中部为西北向,南部为东北向。

南海表面纬向风场 EOF 分析的第三模态(图 3e)呈现出南北两边海表面平均风速量值为负,中部为正的型式,经向风场(图 3f)表示为北部平均风速量值为负,南部和中部平均风速量值为正,但南海南部风速变幅比中部大。分析第三模态时间系数可知,2008 年后纬向风场时间系数(图 4c)呈负值,经向风场(图 4f)为负值,即该时间段内南海北部海域风向大致为西南向,中部为东北向,南部为西北向。

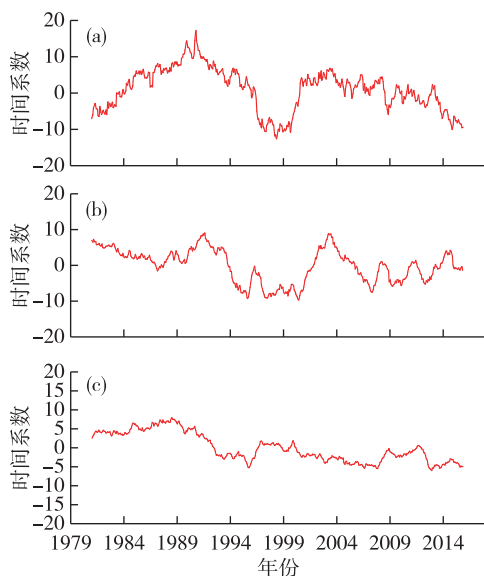


图2 原始风场 EOF 分解前三个模态时间权重系数的 50 个月滑动平均(a.第一模态,b.第二模态,c.第三模态)

Fig.2 The 50-month running mean of time weight coefficients obtained by EOF decomposition of the first three modes of the original wind field (a. the first mode, b. the second mode, c. the third mode)

### 2.3 南海风场季节平均特征

定义春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为当年12月—次年2月。首先将风场原始数据按照季节划分,然后对纬向风矢量 $u$ 、经向风矢量 $v$ 、以及南海近海风速标量分布进行平均化处理,即可分别得到南海近海面风场的四季平均态。

图5a表示南海近海面风场的春季平均态,可以看出春季期间,南海表面平均风速从南到北逐渐增加,南海中部和南部海域风速介于 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,越南沿岸附近海域有一个风速较大区,达 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $120^\circ\text{E}$ , $20^\circ\text{N}$ 附近区域,存在一个东北—西南走向的风速舌状高值区,达到 $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由南海近海面风场的夏季平均态(图5b)可以看出,夏季越南沿岸部分海域仍有一个风速极大值中心,风速达到了 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,海表平均风速从该海域向四周逐渐减小。整片海域风向比较一致,均是西南风,原因是夏季南海上空副热带高压活动频繁<sup>[14]</sup>。秋季平均态(图5c)表现为从南向北依次增加,南海北部有一个东北—西南向的平均风速舌状高值区,风速达到 $8.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。越南沿岸的部分海域和春夏季相对应,有一个平均风速较大中心,达到 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。秋季是夏季风向冬季风转换时期,东北风速增大,西南风速减小,并且该季多发台风,但是由于台风分辨率较小,因此在四季平均态中难以呈现出来。冬季平均态(图5d)表现出南海整片海域风速都较大,存在两个海表面平均风速极大值中心,一个位于越南沿岸部分海域,一个位于东沙群岛,达到 $9.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。整片海域风向比较一致,均呈现东北风。齐义泉等<sup>[15]</sup>分析得出冬季南海海表面风场分布是由于地貌作用,东北季风在巴士海峡和台湾海峡的狭管效应的作用下增强,并沿东北—西南走向的开阔海域侵入南海,对南海海表面平均风速产生了很大的影响。在远离这一海区的海域,东北风在陆地或是岛屿受阻,风速显著减小。

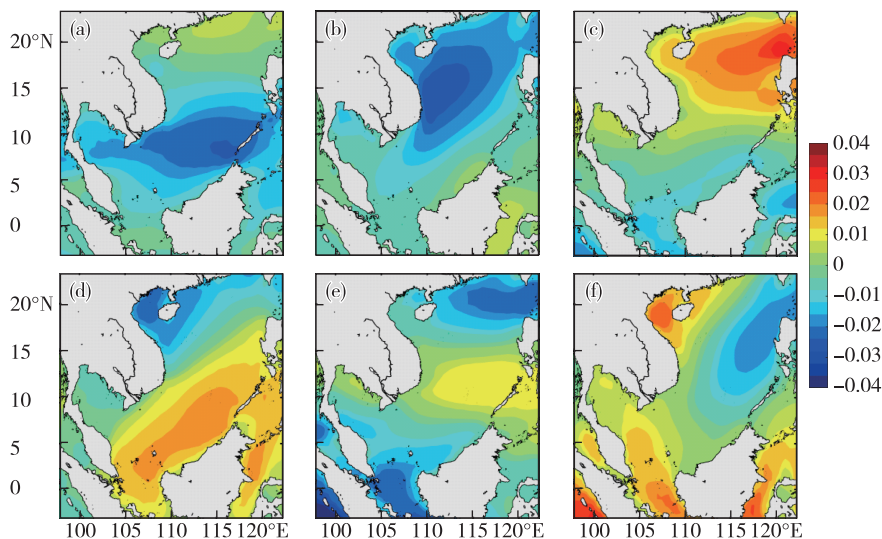


图3 南海风场分量 EOF 分析(a.第一模态纬向风场,b.第一模态经向风场,c.第二模态纬向风场,d.第二模态经向风场,e.第三模态纬向风场,f.第三模态经向风场)

Fig.3 EOF analysis of wind field components over the South China Sea (a/c/e. zonal wind field of the first/second/third mode, b/d/f. meridional wind field of the first/second/third mode)

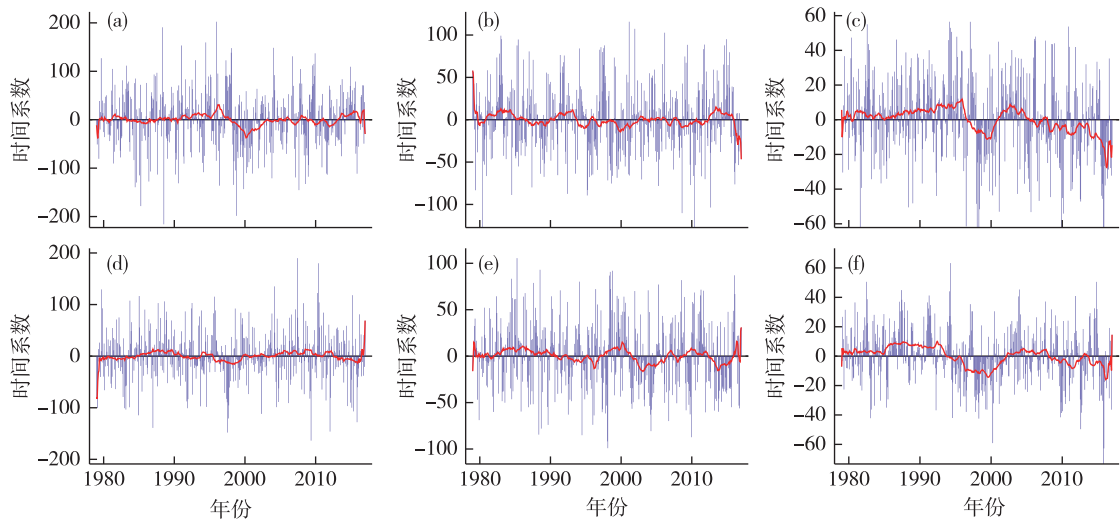


图4 南海风场分量 EOF 分析前三个模态的时间权重系数 (a.第一模态纬向风场 ,b.第二模态纬向风场,c.第三模态纬向风场,d. 第一模态经向风场,e. 第二模态经向风场,f. 第三模态经向风场;蓝色实线为时间系数,红色实线为时间序列的 50 点滑动平均)

Fig.4 Time weight coefficients of the first three modes obtained by EOF decomposition of wind field components over the South China Sea (a/c/e. zonal wind field of the first/second/third mode, b/d/f. meridional wind field of the first/second/third mode; blue solid line: time coefficients, red solid line: 50-point running mean of time series)

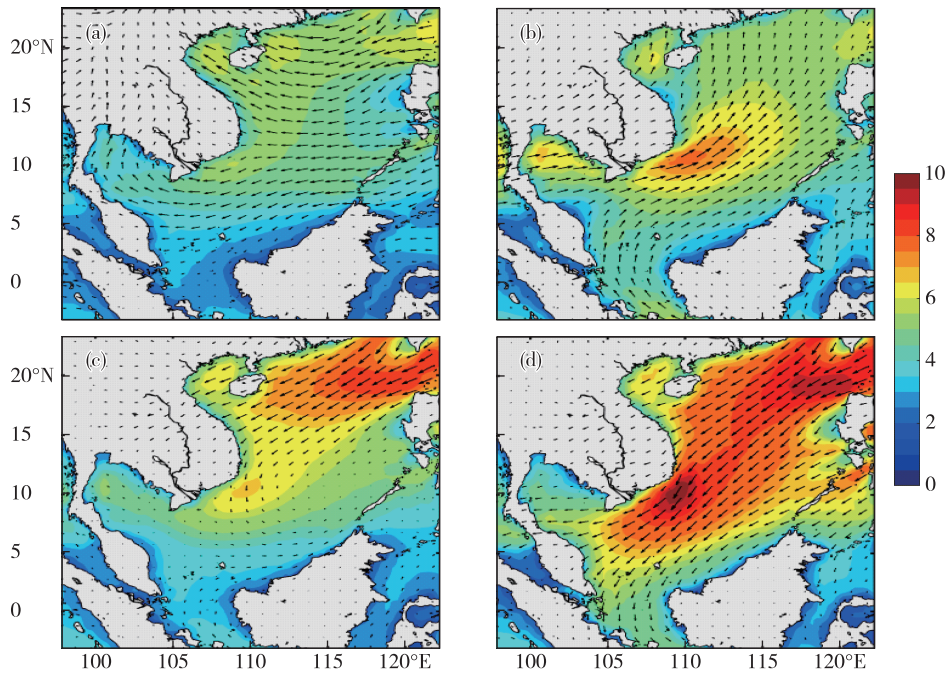


图5 南海 10 m 风场的四季平均态(a.春季,b.夏季,c.秋季,d.冬季)

Fig.5 Seasonal mean state of wind field at 10 m over the South China Sea ( a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

## 2.4 冬夏季风对比分析

在春季和秋季期间,南海海面风场正处于短暂的转换时期,夏季南海盛行夏季风,冬季盛行冬季风,总体上,南海风场呈现冬半年和夏半年的气候特征<sup>[4]</sup>,而冬季和夏季南海海面风场的特征有

很大差异。

夏季风场 EOF 分析结果的第一模态(图 6a)表现出夏季南海中部及南部海域平均风速量值均为负,在南海北部湾和西沙群岛附近海域,量值为正,在南沙群岛附近出现负量值的极大值。冬季南海

近海面风场 EOF 分析结果的第一模态(图 6c)揭示了冬季南海北部海平面风场平均速度变化为正,南部量值为负,正量值中心在台湾西南部,呈舌状分布,负量值中心在中沙群岛附近海域,此结论与前人所做研究<sup>[8]</sup>相符合。

综上所述,冬季南海近海面风场和夏季正好呈反位相式变化,结合夏季 EOF 分析时间系数(图 6b),1979—1993 年及 1999—2006 年,时间权重系数为负,即该时段南海中部及南部海域风速增大,而北部湾及西沙群岛附近风速减小。1994—1998

年及 2007 年之后,时间变化函数为正,即南海中部及南部海域平均风速减小,而北部湾及西沙群岛附近风速增大,从总体趋势上看,南海中部及南部海域风速在减小,而北部湾及西沙群岛附近海域平均风速在增大。冬季 EOF 分析时间系数(图 6d)揭示出 1979—1997 年,时间权重系数为负,表示南海北部海面风场平均速度减小,南部平均速度增大。之后,时间变化函数波动上升,即总的来说,南海北部海面风场平均速度在增大,南部平均风速在减小。

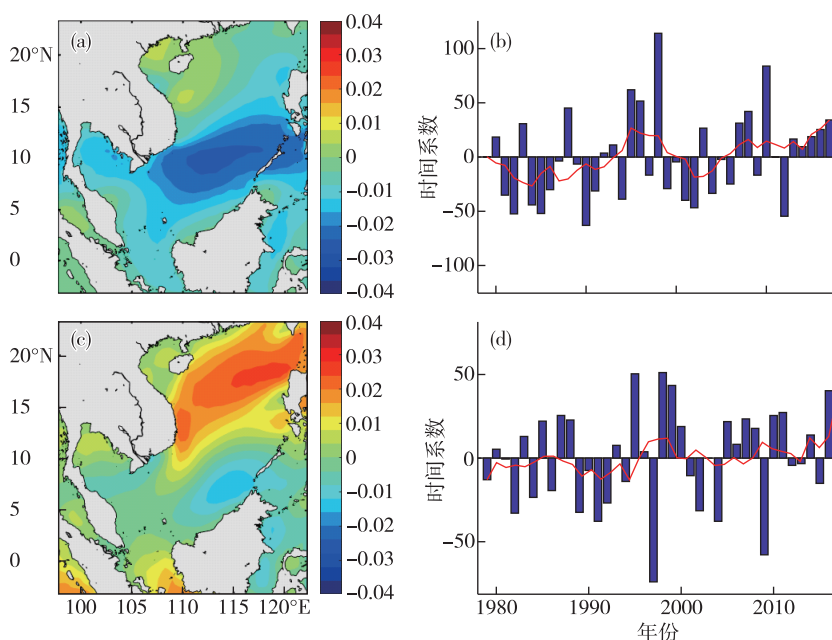


图 6 冬夏季南海海平面风场的 EOF 分析(a.夏季风场 EOF 分析的空间第一模态,b.夏季第一模态对应的时间序列图,c.冬季风场 EOF 分析的空间第一模态,d.冬季第一模态对应的时间序列图;蓝色柱状线为时间系数,红线为时间序列的 7 点滑动平均)

Fig.6 EOF analysis of sea level wind field over the South China Sea in winter and summer (a/c. the first spatial mode of EOF analysis in summer/winter wind field, b/d. time series corresponding to the first mode in summer/winter; blue bar: time coefficients, red line: 7-point running mean of time series)

### 3 南海风场对 ENSO 的响应

#### 3.1 南海风场小波变换

图 7a 为南海风场第一模态时间系数小波功率谱分布,红色实线内是通过 95% 红噪声信度检验的区域。结果表明:1983—1997 年有 4~6 a 较强的振荡周期,在 1983—2004 年表现出 15~18 a 显著的振荡周期。从整个时域看,只有周期为 15~18 a 的功率谱通过了 95% 的显著性水平,表明南海风场第一模态的年代际振荡更为显著,从其对应的实值谱分布(图 7b)中可看出在振荡周期为 15~18 a 的时间尺度上出现了明显的正负相位交替变换。南海风

场 EOF 分析结果的第二模态时间系数功率谱分布(图 7c)中,功率谱在 1994—2005 年存在 3~7 a 较强的年际振荡周期,在 2007—2016 年存在 2~3 a 显著的变化周期,而整个时域上仅 3~4 a 的振荡周期通过了检验,体现了南海近海面风场 EOF 分析结果的第二模态有显著的 3~4 a 的年际振荡周期。从第二模态实值谱(图 7d)中也可看出正负相位交替变换。南海风场第三模态时间系数功率谱分布(图 7e)图表现出功率谱在 1990—1999 年存在 2.5~5 a 显著的振荡周期,2007—2017 年存在 2.5~3 a 的高频振荡周期,但仅周期为 2.5~5 a 的功率谱通过了整个时域上 95% 的显著性水平,表明南海近海面风

场第三模态空间分布呈现出 2.5~5 a 的年际变化。从实值谱分布(图 7f)可看出振幅在对应的时间尺

度下正负相位发生交替变换。

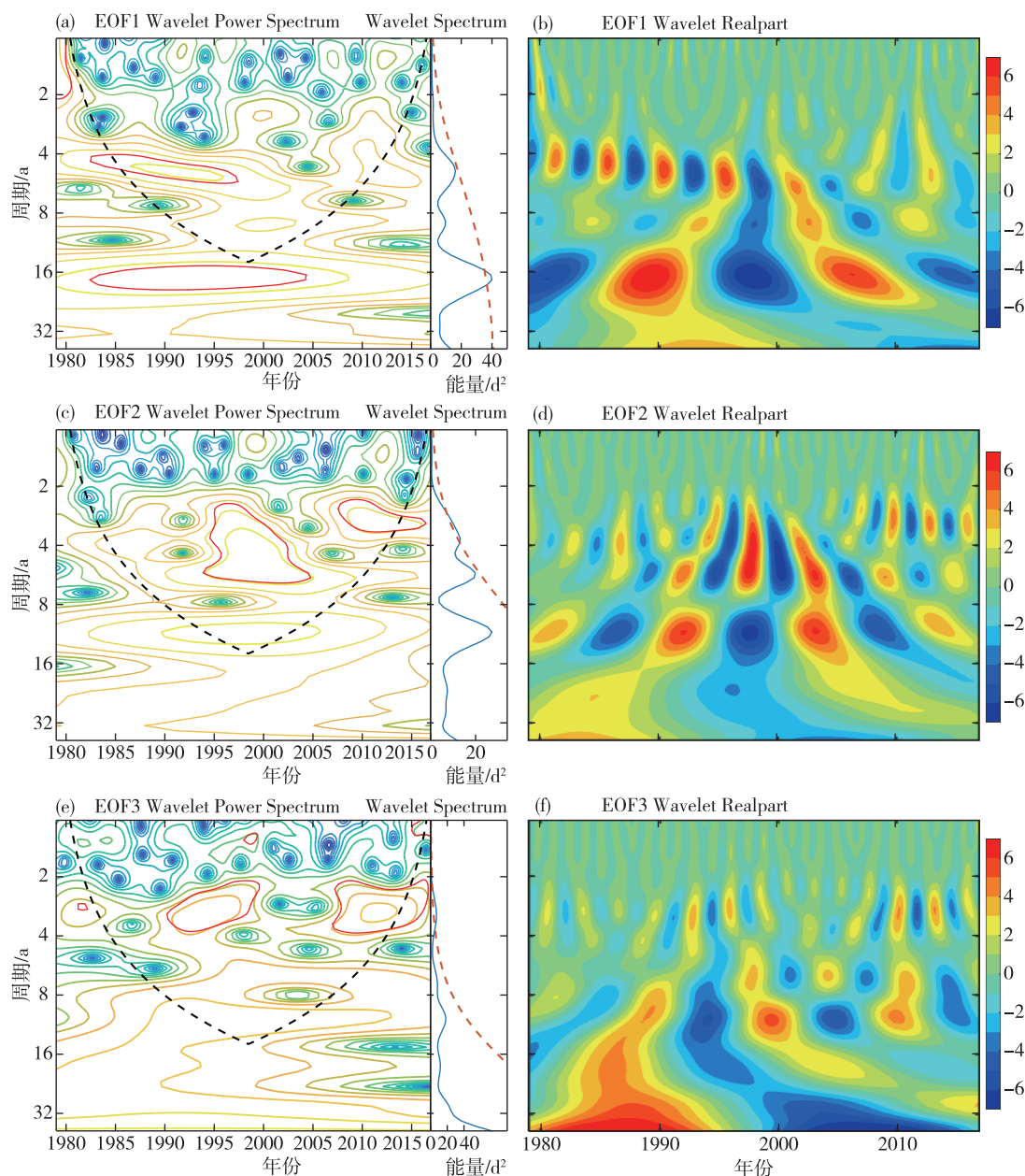


图7 南海风场 EOF 分析的小波功率谱分布(a. 第一模态功率谱分布,b. 第一模态实值谱分布,c. 第二模态功率谱分布,d. 第二模态实值谱分布,e. 第三模态功率谱分布,f. 第三模态实值谱分布;红色实线内为通过 95%红噪声信度检验的区域,黑色虚线为锥形影响域,小波全谱中红色虚线表示通过 5%显著性水平检验,蓝色实线为小波全谱)

Fig.7 Distribution of wavelet power spectrum by EOF analysis of the wind field over the South China Sea (a/c/e. power spectrum of the first/second/third mode, b/d/f. real-valued spectrum of the first/second/third mode; red solid circle: passing the red noise reliability test at 95% level, black dotted line: cone-shape domain of influence, red dotted line: passing the significance test at 5% level, blue solid line: full spectrum)

沈春等<sup>[7]</sup>利用 QuikSCAT 风场产品共 125 个月的风场数据,对其进行谱分析,结果表明,南海原始风场第一模态主要体现出年周期变化,第二模态表现半年周期变化,第三模态呈现出年周期变化。齐义泉等<sup>[16]</sup>基于 T/P 高度计资料中共 59 个月的风速

数据,得到和前者同样的结论。本文利用小波变换得到的分析结果与前人所作成果有所出入,表明在 39 a(共 468 个月)的长时间序列下,南海近海面风场第一模态的空间分布呈现年代际变化,第二模态和第三模态均表现为年际变化。

### 3.2 ENSO 时频特征

利用 Nino3.4 指数表征 ENSO,分析得出功率谱在 1979—2017 年有 2~7 a 显著的高能量区,在 1995—2014 年表现 12~14 a 较强的年代际振荡,而整体时域上仅 2~7 a 的振荡周期通过了 95% 的显著性水平,由此得出 ENSO 现象主要呈现出 2~7 a 的变化周期。

### 3.3 ENSO 和南海风场的相关

由图 8a 可以看出,南海风场第一模态时间系数与 Nino3.4 指数的交叉小波功率谱高能量区在 1983—1997 年表现出 3.2~6 a 的显著周期,在整个时段上间断性出现了 1~2 a 的振荡周期。为了探究南海近海面风场第一模态与 ENSO 之间的相关性,本文引出了小波相干(图 8b),Nino3.4 和南海风场在 1980—1990 年显示出极强的相关性,而在 1990 年后小波功率主要表现为低频振荡,即相关性减弱。从平均相位角可知南海风场 EOF 第一模态超

前 ENSO3/8 周期。

南海风场 EOF 分析结果的第二模态和 Nino3.4 的小波交叉功率谱(图 8c)揭示出交叉小波功率谱在整个时段内几乎都存在显著振荡周期,由南海风场第二模态和 Nino3.4 的小波相干图(图 8d)看出,交叉小波功率谱在整个研究时段上都出现了显著振荡,共振周期分别为 3~6 a 的年际振荡和 10 a 的年代际振荡,小波功率值较大,表明南海风场变化和 ENSO 事件显著相关。且 EOF 第二模态在 1982—1992 年超前 ENSO1/8 周期,而 1982—2002 年,2003—2016 年,ENSO 与南海风场 EOF 第二模态呈现同位相变化。

南海风场第三模态空间分布与 Nino3.4 的小波交叉功率谱(图 8e)在 1988—2017 年呈现高频振荡,并且表现出 1~4 a 的共振周期,两者的小波相干图(图 8f)呈现出交叉小波功率谱的共振区域近年来加大,在 2008 年后,Nino3.4 超前南海风场 EOF

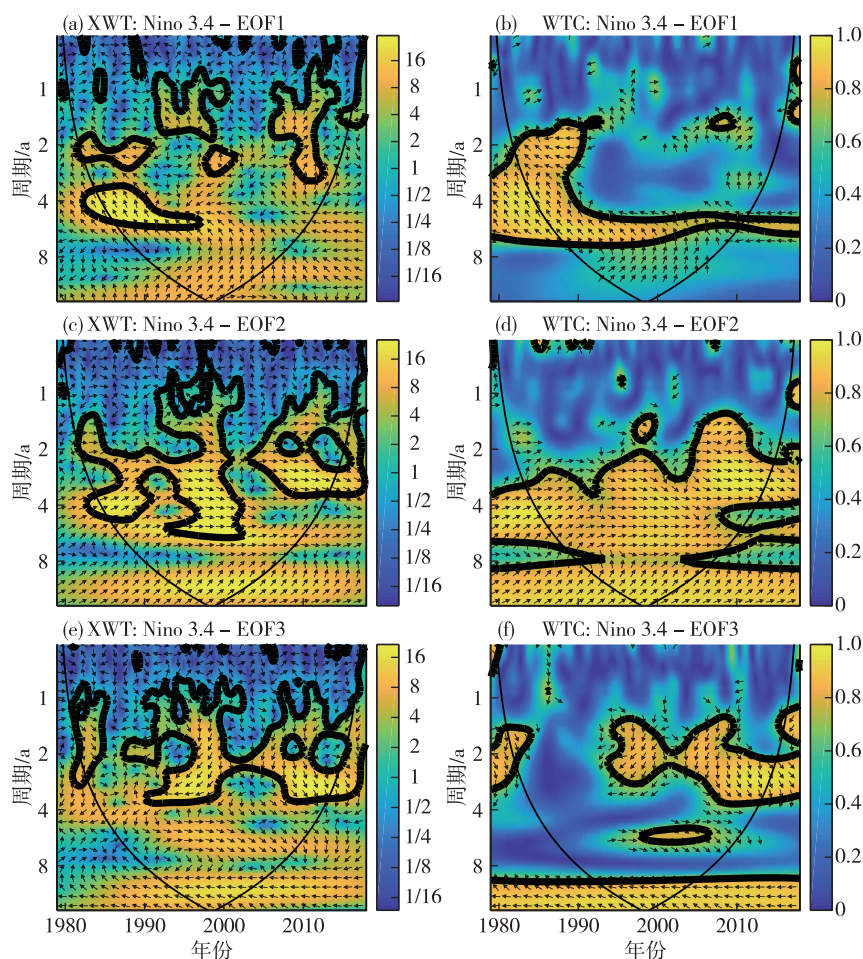


图 8 南海风场与 Nino3.4 的相关(a.第一模态小波交叉功率谱,b.第一模态小波相干图,c.第二模态小波交叉功率谱,d.第二模态小波相干图,e.第三模态小波交叉功率谱,f.第三模态小波相干图)

Fig.8 Correlation between the wind field over the South China Sea and Nino 3.4 (a/c/e. wavelet cross-power spectrum of the first/second/third mode, b/d/f. wavelet coherence diagram of the first/second/third mode)

第三模态 7/8 周期。由以上分析可得出南海近海面风场第三模态和 ENSO 显著相关,且近年来相关性逐渐增强。

#### 4 结论

基于 ECMWF 海表面 10 m 风场资料,分析研究了南海风场变化与  $u$ 、 $v$  分量的长期特征、南海冬夏季风场的差异、南海风场不同模态的时频特征及其对 ENSO 的响应,得到以下结论:

1)南海海面风场第一模态中平均风速同位相变化,海表面平均风速呈减小趋势;第二模态中南海北部和中部平均风速量值呈“跷跷板”式反位相分布,南海北部和南部平均风速呈减小趋势,中部增大;第三模态中南海中部海域平均风速变化与南海南部和北部海域表现出反位相分布,南海中部海表面平均风速趋于减小,北部和南部增大。

2)南海近海面风场第一模态空间分布表现出 2012—2017 年南海北部海域风向大致为西南向,中部和南部为东南向;第二模态表现为 2012 年后南海北部海域为西南风向,中部为西北风向,南部为东北风向;第三模态呈现出 2008 年后南海北部海域大致为西南风向,中部为东北风向,南部为西北风向。

3)春季南海表面平均风速从南到北逐渐增加;夏季在越南沿岸部分海域仍有一个风速极大值中心,从该海域向四周逐渐减小,整片海域风向均是西南风;秋季从南向北依次增加;冬季南海整片海域风速都较大,存在两个极大值中心。

4)冬季南海近海面风场和夏季呈反位相式变化,夏季 1979—1993 年及 1999—2006 年南海中部及南部海域风速增大,而北部湾及西沙群岛附近风速减小,1994—1998 年及 2007 年之后反之。冬季 1979—1997 年南海北部海面风场平均速度减小,南部增大,1997 年后反之。

5)南海近海面风场第一模态的空间分布呈现年代际变化,第二模态和第三模态均表现为年际变化。第一模态与 ENSO 在一定的时段存在着相似的振荡周期,但相关性在 1990 年后趋于减小。ENSO 与南海风场 EOF 第二模态和第三模态均显著相关,且近年来 ENSO 与南海风场第三模态的相关性逐渐

增强。

#### 参考文献:

- [1] 赵振国,蒋伯仁,陈国珍,等. ENSO 事件对中国气候的可能影响[J]. 山东气象, 2000, 20(1): 4-12.
- [2] 张人禾,闵庆烨,苏京志. 有关副热带太平洋对 ENSO 影响研究的综述[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 1-9.
- [3] 薛德强,李怀刚,邹瑾,等. ENSO 事件与区域气候异常的统计事实[J]. 山东气象, 2000, 20(4): 7-10.
- [4] 赵振国,蒋伯仁,陈国珍,等. ENSO 事件与青藏高原积雪和东亚大气环流的可能联系[J]. 山东气象, 1999, 19(4): 1-8.
- [5] 任永政. 从卫星 TerraSAR-X 图像反演海面风场和海表流场方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [6] 王静,齐义泉,施平. 南海海面风、浪场的 EOF 分析[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 136-140.
- [7] 沈春,蒋国荣,施伟来,等. 南海 QuikSCAT 海面风场变化特征分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(3): 1-8.
- [8] 齐义泉,施平. 采用卫星高度计资料分析南海风、浪的月平均特征[J]. 热带海洋学报, 1999, 18(2): 90-96.
- [9] Xie S-P, Annamalai H, Schott F A, et al. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability[J]. J Climate, 2002, 15(8): 864-878.
- [10] Wang C. Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation[J]. J Climate, 2002, 15(4): 399-419.
- [11] 李晓惠,徐峰,陈虹颖,等. 1980—2016 年西太平洋暖池与 ENSO 循环过程的相关分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(3): 85-94.
- [12] 王静,齐义泉,施平,等. 基于 TOPEX/Poseidon 资料的南海海面高度场的时空特征分析[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(4): 26-33.
- [13] 夏天竹,徐峰,王慧,等. 近 35 a 南海海-气温差不同资料比对及变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2015, 31(6): 852-861.
- [14] 齐义泉,施平,毛庆文. 南海海面风场和浪场季平均特征的卫星遥感分析[J]. 中国海洋平台, 1997, 12(3): 118-122.
- [15] 齐义泉,施平,毛庆文. 南海海面风速季节特征的卫星遥感分析[J]. 热带海洋, 1996, 15(1): 68-73.
- [16] 齐义泉,施平,毛庆文,等. 基于 T/P 资料分析南海海面风、浪场特征及其关系[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2003, 18(5): 619-624.