

南海海面风场、高度场和温度场近十年的 变化趋势及年际变化特征

王佳莹¹, 方国洪^{1,2,3*}, 王永刚^{1,2,3}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学和数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 利用 2002—2011 年南海海面风场、高度场和温度场的月平均资料分析了这些要素的变化趋势及年际变化特征。计算得到区域平均海面风东分量的线性趋势为 $(-0.012 \pm 0.014) (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$, 北分量的线性趋势为 $(-0.014 \pm 0.019) (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$, 其年际变化与 $\text{NI}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数相关系数可达 0.63, 滞后 1 个月; 区域平均海面风应力旋度的线性趋势为 $(0.099 \pm 0.330) \times 10^{-9} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \text{a}^{-1}$, 其年际变化与中太平洋厄尔尼诺 (EMI) 指数呈高度相关, 达到 -0.85, 滞后 3 个月; 区域平均海面高度的线性趋势为 $(0.665 \pm 0.200) \text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$, 其年际变化与 EMI 指数相关系数可达 -0.80, 滞后 2 个月; 区域平均海表温度的线性趋势为 $(-0.016 \pm 0.017) ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 其年际变化与 $\text{NI}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数相关系数可达 0.68, 滞后 4 个月。其中海表温度的负趋势与近期全球变暖的停滞相一致。采用经验正交函数分解方法分析了各要素的年际变化特征, 结果显示海面风场的第一模态呈现海盆尺度的反气旋格局, 其对应的时序与 $\text{NI}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$ 指数相关系数最大可达 0.68, 滞后 5 个月。海面高度场的第一模态沿南海东边界和越南东部出现较高值, 其对应的时序的变化滞后于 EMI 指数 3 个月, 呈负相关, 但系数最大为 -0.32。海面温度场的第一模态呈西高东低的分布状态, 其对应的时序与 $\text{NI}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数的相关系数最大可达 0.62, 滞后 4 个月。

关键词: 南海; 风场; 高度场; 温度场; 变化趋势; 年际变化

中图分类号: P731.11

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)02-0159-17

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.02.002

南海是太平洋最大的一个边缘海, 水域面积约为 365 万 km^2 , 平均水深约为 1 200 m, 其中最深处位于南海中部偏北, 约为 5 000 m。南海北靠中国大陆和台湾岛, 其间有台湾海峡与东海相连; 南临加里曼丹和苏门答腊岛, 经卡里马塔海峡与爪哇海相连; 东临菲律宾群岛, 经吕宋海峡和明都洛海峡与太平洋相连; 西临中南半岛和马来半岛, 其南端有马六甲海峡与安达曼海相通(图 1)。我们取 $98^\circ \sim 124^\circ \text{E}$, $2^\circ \text{S} \sim 24^\circ \text{N}$ 的区域作为研究范围。

南海的地理位置决定了其环境受东亚季风的影响而表现出强烈的季节性变化。同时, 作为热带太平洋的边缘海, 南海环境也展示了十分显著的年际变化特征。

对于南海各要素的研究一直是物理海洋学家关注的热点。Chao 等^[1]利用美国气候中心 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 风应力资料分析了 1982—1983 年 ENSO 事件与南海海面风场异常的相关性。Wu 等^[2]利用美国国家环境预报中心 (NCEP) 的再分析风应力资料分析了 1992—1995 年间南

收稿日期: 2016-02-29

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目——南海环流和海峡水交换对海气相互作用的影响 (2011CB403502); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目——海洋环境动力学和数值模拟 (U1406404)

作者简介: 王佳莹 (1991-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学方面研究。E-mail: wangjy@fio.org.cn

* 通讯作者: 方国洪 (1939-), 男, 浙江瑞安人, 研究员, 博士, 主要从事海洋潮汐、海洋环流和海洋数值模拟方面研究。

E-mail: fanggh@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

海的季节和年际变化特征。Liang 等^[3]利用欧洲中期天气预报的再分析结果研究了 1997—1998 年厄尔尼诺事件期间南海风场的异常现象。Hwang 和 Chen^[4]利用 ERS-1/2 卫星观测 5 a 海面风应力资料研究了南海从季节到年际的变化特征。

在很多前人利用卫星高度计资料的研究中都表明,南海海面高度存在显著的季节、年际和长期变化。例如 Ho 等^[5]的研究中提到南海海面高度场对厄尔尼诺现象的响应;Li 等^[6]发现在 1993—1999 年间南海的海面高度以平均每年 1 cm 的速度升高。

Chu 等^[7]利用 1982—1994 年 NCEP 的海表温度月平均数据研究南海海表温度的时空变化特征,给出了海表温度的季节分布特征并定义了南海北部强烈的冷暖异常。Klein 等^[8]发现海表温度变化滞后 ENSO 指数 5 个月发生。Wang 等^[9]揭示了 1997—1998 年南海暖事件及其与厄尔尼诺事件的密切联系。Liu 等^[10]发现南海冬季冷舌的变化特征与 NIÑO3 指数有很好的相关性。

以上的研究都涉及南海环境要素与 ENSO 的关系,但是大部分都只涉及一种要素。此外,除了海面高度场,其他要素的整体趋势都没被提及。Fang 等^[11]对南海海面风场、高度场和温度场的变化趋势和年际变化同时进行了分析,揭示了这些环境参量重要的变化特征。由于当时可利用的资料只到 2003 年,而现在可获取的海面风场观测资料序列最长可到 2011-12,海面高度场观测资料可到 2014-04,海表温度场资料可到 2015 年。为统一,我们将对 2002—2011 年的这些要素进行分析。

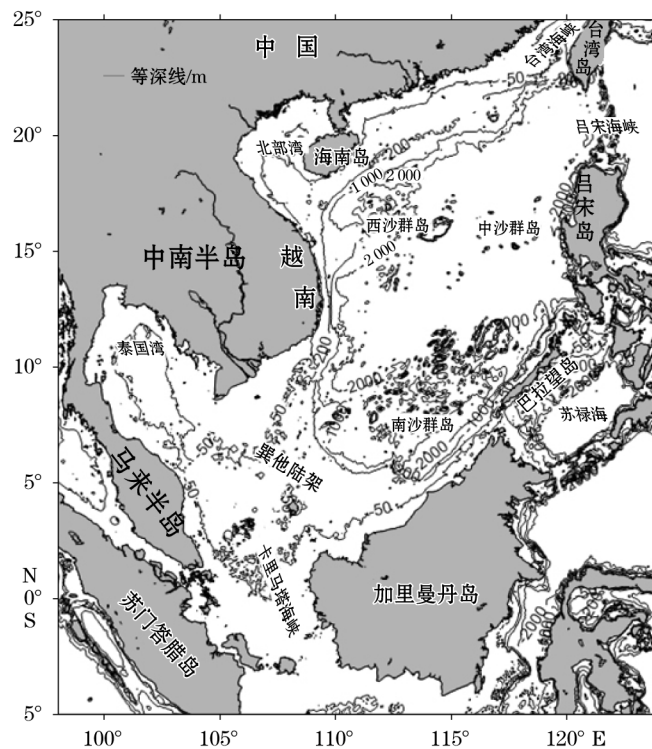


图 1 南海地图

Fig.1 Map of the South China Sea

1 资料来源与数据处理

我们采用的海面高度资料是法国卫星中心(Aviso)的 Ssalto/Duacs 多任务高度计(包括 Saral, Cryosat-2, Jason-1/2, T/P, Envisat, GFO, ERS1/2 和 Geosat)产品,是由周平均延迟海平面距平资料进行每月平均计算得到的月平均资料,空间分辨率为 $(1/4)^{\circ} \times (1/4)^{\circ}$,当前可获取的时间序列为 1993-01—2014-04;海表

温度资料是美国国家环境预报中心(NCEP)的 Reynolds 最优插值海面温度产品,是由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,NOAA)的高级甚高分辨率辐射计(AVHRR)得到的卫星 SST 数据和由现场 SST 观测值通过最优插值得到的月平均资料,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,可获取的时间序列为 1981-12 至今;在 Fang 等^[11]的文章中采用的风场资料来自法国 ERS-1 数据处理与归档中心(Centre ERS d'Archivage et de Traitement)的 CERSAT 资料,由于 CERSAT 的时间序列较短(1992-02—2007-12),因而在本研究中采用的海面风场资料改用 CCMP(cross-calibrated multi-platform,多平台交互校正)月平均风场资料,该产品是通过变分分析方法对由遥感系统得到的交互校准卫星风场资料进行处理,得到高分辨率 $(1/4)^{\circ} \times (1/4)^{\circ}$ 的分析结果,其中交互校准卫星风场资料来自 SSM/I,SSMIS,AMSR-E,TRMM TMI,QuikSCAT,SeaWinds,WindSat 和一些其他的卫星仪器,可获取的时间序列为 1988-01—2011-12。此外,我们还利用 CCMP 风场资料计算得出海面风应力场。为统一资料时间长度,本研究选取 2002-01—2011-12 作为 4 组数据的统一时间长度。

我们着重研究这十年变化趋势和年际变化特征,因此在进行资料处理时对所有格点数据进行了 12 个月的滑动平均,滤掉频率高于每年一周的信号,特别也去掉了季节信号。在对资料进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function,EOF)分析时,我们先对资料进行去线性趋势的处理,即用原始资料减去平均值和线性趋势值,以滤掉背景场的影响。为了便于比较,我们还计算了气候态月平均场和年平均场。

2 背景场分析

2.1 风 场

南海地处东亚季风区,受季风影响较大。图 2a 为 1 月气候态平均风场,由图可以看出,冬季整个南海海域都被较强的东北季风控制着。图 2b 为 1 月气候态平均风应力旋度场,由图可知吕宋岛西侧和南海南部出现了气旋性风应力旋度。图 2c 为 7 月气候态平均风场,由图可知夏季南海主要被西南风控制,且南海南部风速大于北部风速,最大风速出现在中南半岛的东南外海。图 2d 为 7 月气候态平均风应力旋度场,对应图 2b 中风速最大的位置北部有一个气旋性风应力旋度结构,其南部有一个反气旋性风应力旋度结构。这种形式的风应力场是形成东南越南离岸流的原因。图 2e 为气候态年平均风场,图中南海主要被偏北风控制,北部风速大于南部风速,说明冬季季风要强于夏季季风,且两者之差在南海北部更大。图 2f 为气候态年平均风应力旋度场,图中在吕宋岛西侧和中南半岛东侧各有一个气旋性风应力旋度结构,前者大于后者。本文得到的气候态平均风场图和风应力旋度场图与 Fang 等^[11]利用 1993—2003 年 CERSAT 风场资料计算得到的结果大体一致。Lian 等^[21]给出了由 9 种风应力资料计算得到的气候态平均风应力旋度场图,表明高分辨率资料得到的结果更为合理。我们得到的分布特征与 Lian 等^[21]所得结果基本一致。

2.2 高度场

图 3a 为南海 1 月气候态平均海面高度场(SSH),总体上呈西北高、东南低,显然与冬季东北季风有关。此外,在吕宋岛西侧和中南半岛东南部各有一个低 SSH 区域,与图 2d 中的气旋性风应力旋度对应,表明该海面高度异常是由风应力旋度引起的。图 3b 为南海 7 月气候态平均海面高度场,总体上呈西北低、东南高,显然与夏季西南季风有关。此外,在 $(110^{\circ}\text{E}, 10^{\circ}\text{N})$ 附近还有一个较弱的高 SSH 区域,这个高 SSH 区会在 8,9 月进一步发展变强,形成一个反气旋式环流。图 3c 为海面高度的气候态年平均,总体上为正值,数值在 3~4 cm,系南海海面高度呈升高趋势的结果。Fang 等^[11]利用 1993—2003 年 AVISO 海面高度资料计算得到的气候态平均海面高度场图与本文中分布相似。Ho 等^[5]利用 1992-11—1997-10 的 T/P 海面高度资料计算各月气候态平均海面高度场分布,其中 1 月和 7 月分布结构与本文的结果大体一致。与前人结果的主要差别是,我们得到的平均海面高度要比他们的略高,这是由于海平面在不断上升而我们采用了更新近的资料。

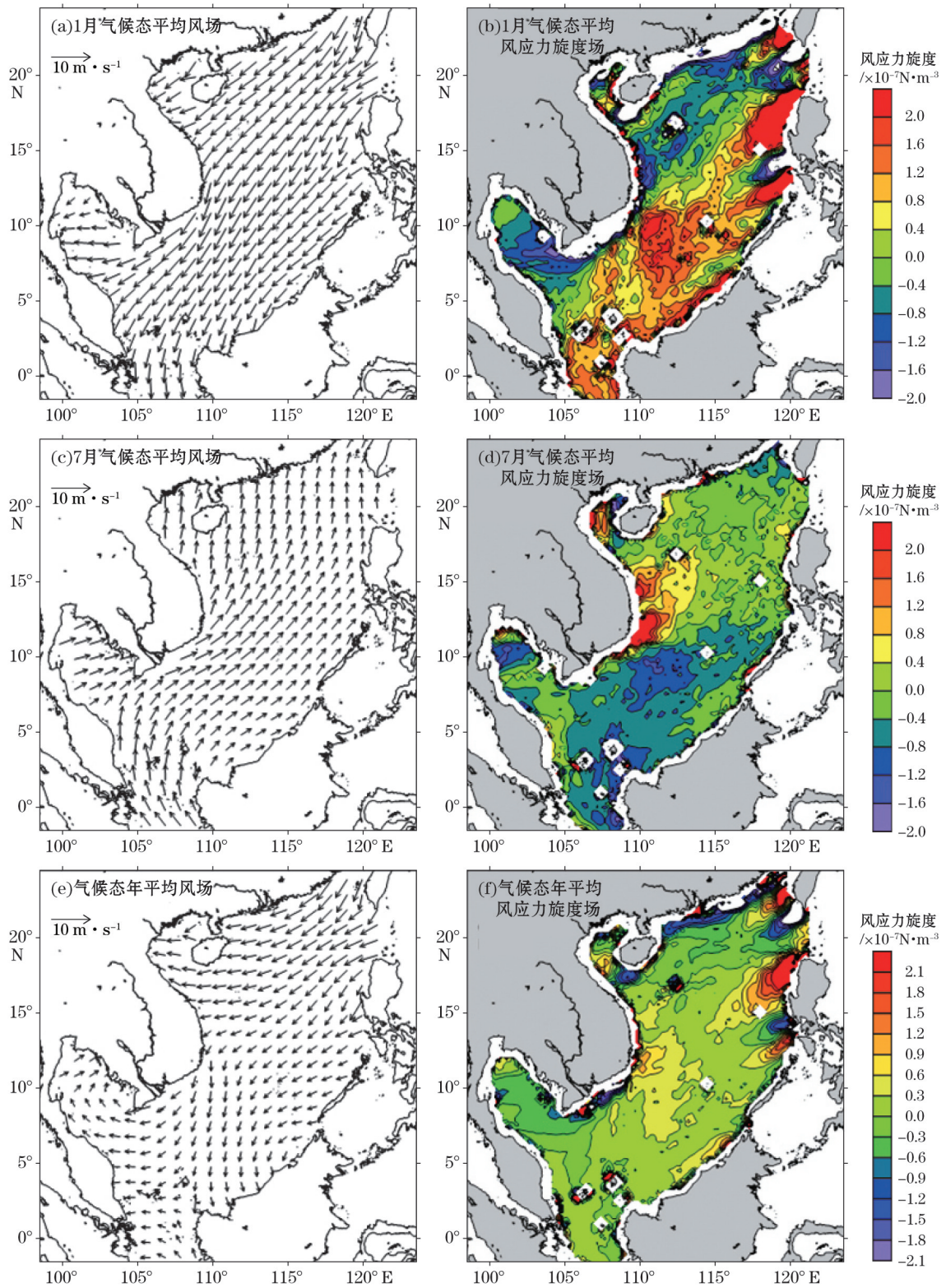


图2 2002—2011年期间南海海面风场及南海海面风应力旋度场

Fig.2 Climatological mean fields of the surface winds and the wind stress curl during 2002—2011

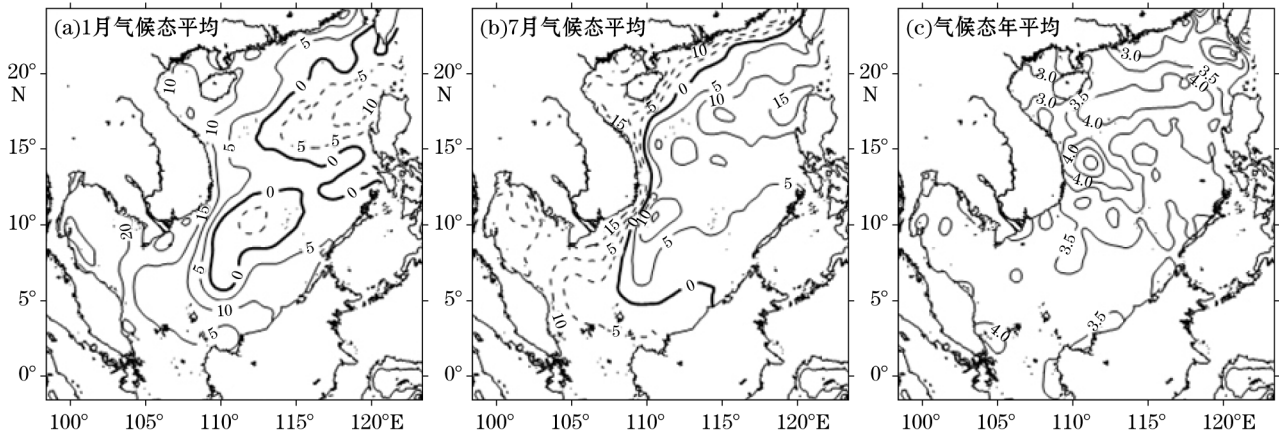


图 3 2002—2011 年期间南海海面高度场(cm)

Fig.3 Climatological mean fields of the sea surface height anomalies(cm) during 2002—2011

2.3 温度场

图 4a 为 1 月气候态平均海表温度场,可以明显看出海面温度呈北低南高分布,且南海北部等温线更为密集,变化梯度更大。这是由于冬季东北季风导致的,东北季风对南海北部的影响有 2 种作用方式,一是季风直接带来的干冷空气使海面水温降低,二是季风在北部形成西南向沿岸流,将较冷的沿岸水由东海经台湾海峡带入南海。图 4b 为海面温度场 7 月气候态平均,等温线分布仍是北高南低,只是较冬季分布来得均匀,南北梯度比冬季要小。同时,在越南东南沿岸出现了一个冷水舌,这个冷水舌是由上升流引起的。图 4c 为海表温度场气候态年平均,等温线分布与图 4a 类似,只是南北梯度相对变小。Fang 等^[11]利用 1993—2003 年 NCEP 海表温度资料分析所得的气候态平均海表温度场图分布与本文所得结果相近。Xie 等^[22]利用 1985—1999 年 AVHRR 海表温度资料计算得到的 7 月气候态平均分布图与图 4b 中分布基本一致。Chu 等^[7]利用 1982—1994 年 NCEP 的海表温度资料计算得到的气候态年平均分布图与图 4c 也基本一致。与前人结果的主要差别是,本文得到的平均海表温度要比他们的略高,这是由于海表温度在不断上升而我们采用了更新近的资料。例如与 Xie 等^[22]比较,我们得到的 7 月气候态平均 SST(图 4b)在越南东南外海低于 29 °C 的范围要明显小于他们的结果^[22](图 3b)。

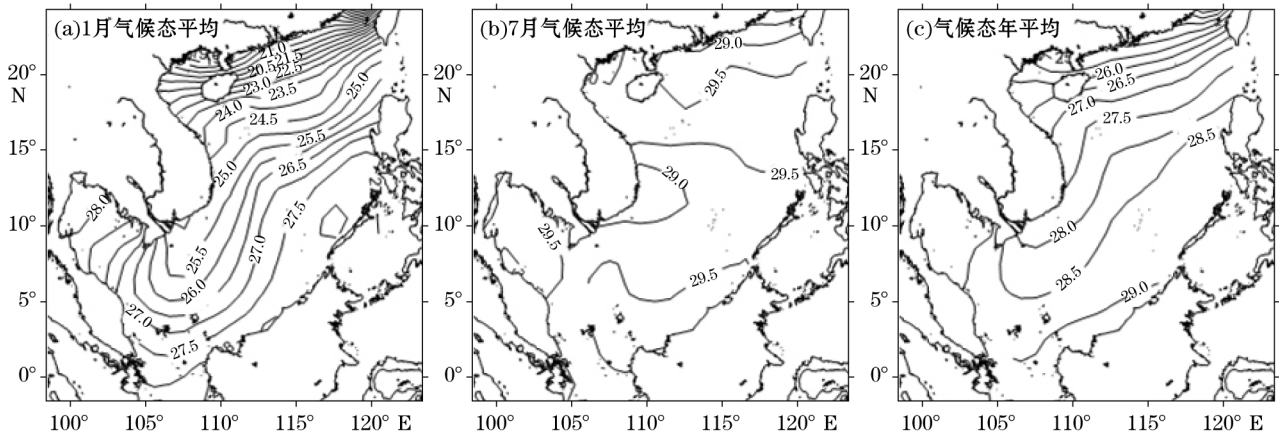


图 4 2002—2011 年期间南海海表温度场(°C)

Fig.4 Climatological mean fields of the sea surface temperature during 2002—2011 (°C)

3 线性趋势

本文利用最小二乘法求取各参量的线性趋势,最小二乘法是通过最小化偏差的平方和来寻找数据的回归系数,即趋势值。图 5 中曲线为南海海面风速东分量和北分量、海面高度和海表温度区域平均值的时间序列,直线代表利用线性回归分析方法得到的线性趋势。图 6 为南海海面风场、高度场和温度场线性趋势的空间分布。本文对所有资料都事先进行了 12 个月滑动平均,因此结果中不存在季节信号。

表 1 2002—2011 年南海海面风场、海面风应力旋度场、海面高度场和海表温度场的线性趋势值和标准差

Table 1 Linear trends and standard deviations of the Surface Wind, Sea Surface Wind Stress Curl, Sea Surface Height, and Sea Surface Temperature of the South China Sea during 2002—2011

参 量	风场东分量 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$	风场北分量 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$	风应力旋度场 / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \text{a}^{-1}$	高度场 / $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$	温度场 / $^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$
趋势值±标准差	-0.012 ± 0.014	-0.014 ± 0.019	$(0.099 \pm 0.33) \times 10^{-9}$	0.665 ± 0.200	-0.016 ± 0.017

表 1 给出了各要素线性趋势及其标准差,其中标准差根据 Fang 等^[11] (Appendix A)提供的方法计算。图 5a 是南海区域平均的海面风场东分量和北分量的时间序列和线性趋势图(2002—2011 年),由图可知,风场东分量的区域平均趋势为 $(-0.012 \pm 0.014) (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$ (表 1),风场北分量的区域平均趋势为 $(-0.014 \pm 0.019) (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$ 。图 6a 是海面风场线性趋势的空间分布图,南海区域大体为东风,在南海海盆西部和南海南部分别出现了辐聚和辐散,同时南海北部风速增长率要小于南海南部风速增长率,最大风速增长率出现在巴拉望岛西侧。

图 5b 是南海海域平均海面风应力旋度的时间序列和线性趋势图(2002—2011 年),海面风应力旋度场的区域平均趋势为 $(0.099 \pm 0.33) \times 10^{-9} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \text{a}^{-1}$,呈上升的趋势。图 6b 是海面风应力旋度场线性趋势的空间分布图,由图可知,南海海域风应力旋度整体呈上升趋势分布,在南海海盆中存在一条东北—西南方向的条带,这里风应力旋度呈下降趋势。

图 5c 是南海区域平均的海面高度场的时间序列和线性趋势图(2002—2011 年),海面高度区域平均的线性趋势为 $(0.665 \pm 0.200) \text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,呈上升趋势,与 Fang 等^[11]得到的 1993—2003 年上升速率基本相同。Church 等^[12]给出的全球海面高度上升率(1950—2000 年)为 $(0.180 \pm 0.030) \text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,冯伟等^[13]估计所得的全球海面高度上升率(2005—2013 年)为 $(0.272 \pm 0.070) \text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,这表明近 20 a 南海海平面上升速率显著高于全球速率。通过对比图 5b 和 5c 可知,海面高度场的时间序列变化与海面风应力旋度场的时间序列变化具有一定相关性,说明海面高度的年际变化受到风应力旋度变化的影响。图 6c 是海面高度线性趋势的空间分布图,整体趋势值在 $0.1 \sim 1.3 \text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 范围内,其中深海盆区有相对较高的上升速率,最大的上升速率位于吕宋岛的西侧。

图 5d 是南海区域平均的海表温度的时间序列和线性趋势图。2002—2011 年期间线性趋势为 $(-0.016 \pm 0.017) ^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$,呈下降趋势。鉴于 Reynolds 最优插值海表温度产品的时间范围为 1982—2015 年,故作为比较,我们还计算了 1982—2015 年南海区域平均海表温度的线性趋势,得到的数值为 $0.006 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$,比 Fang 等^[11]计算得到 1982—2004 年线性趋势 $0.026 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 要小。这个结果与前面得到的近十年负增温率一致。从 20 世纪末以来,全球变暖出现了停滞现象^[14],南海海表温度的负增温应当是全球变暖停滞的一个反映。图 6d 是海面温度场线性趋势的空间分布图,整体趋势值的范围为 $-0.05 \sim 0.03 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$,南海区域内大部分增温率为负值,在南中国陆架和巽他陆架附近负增温率最大,而在吕宋海峡附近却出现正增温。

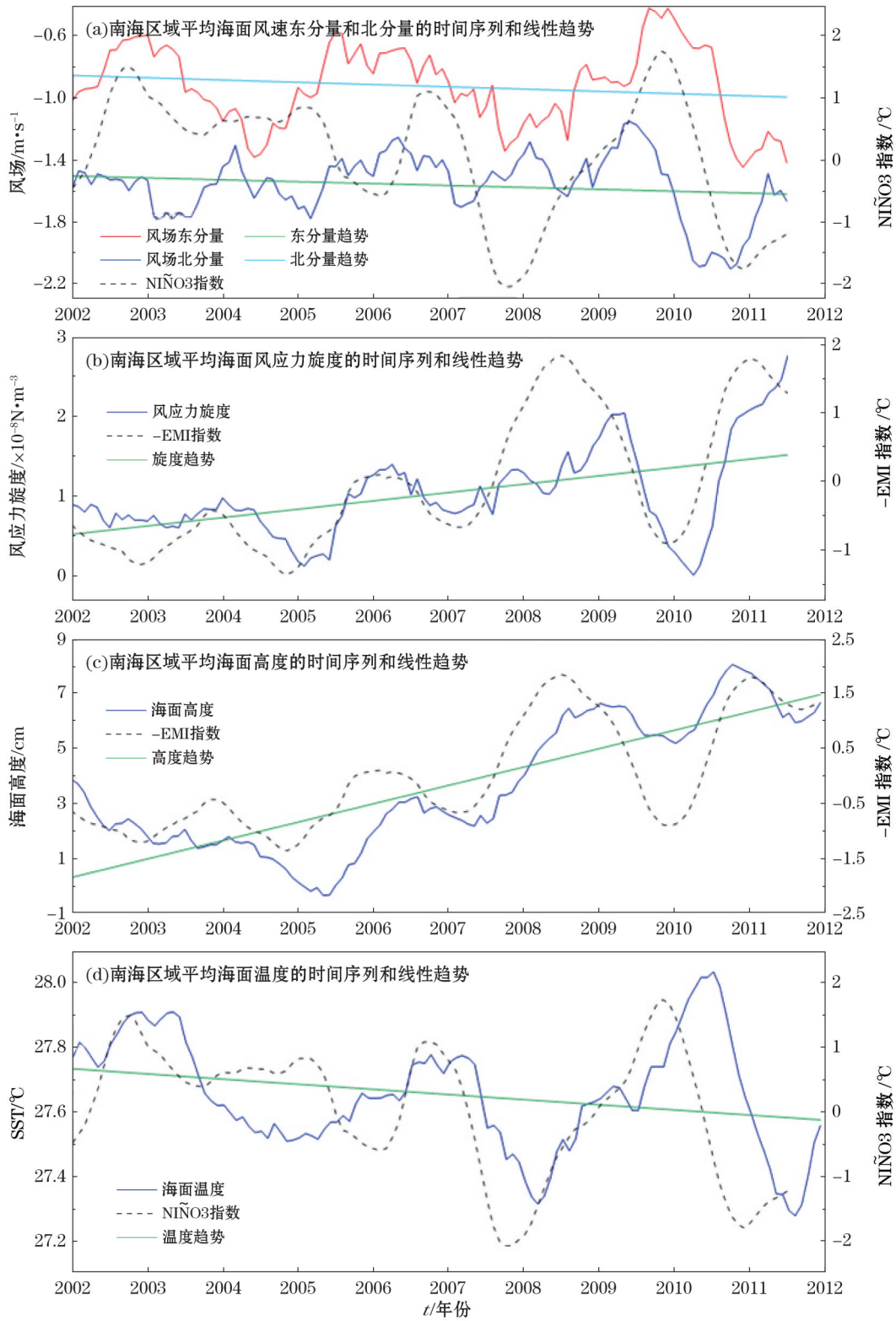


图 5 2002—2011 年期间南海各参量区域平均值的时间序列和线性趋势

Fig.5 Time series and linear trends of South China Sea regional means during 2002—2011

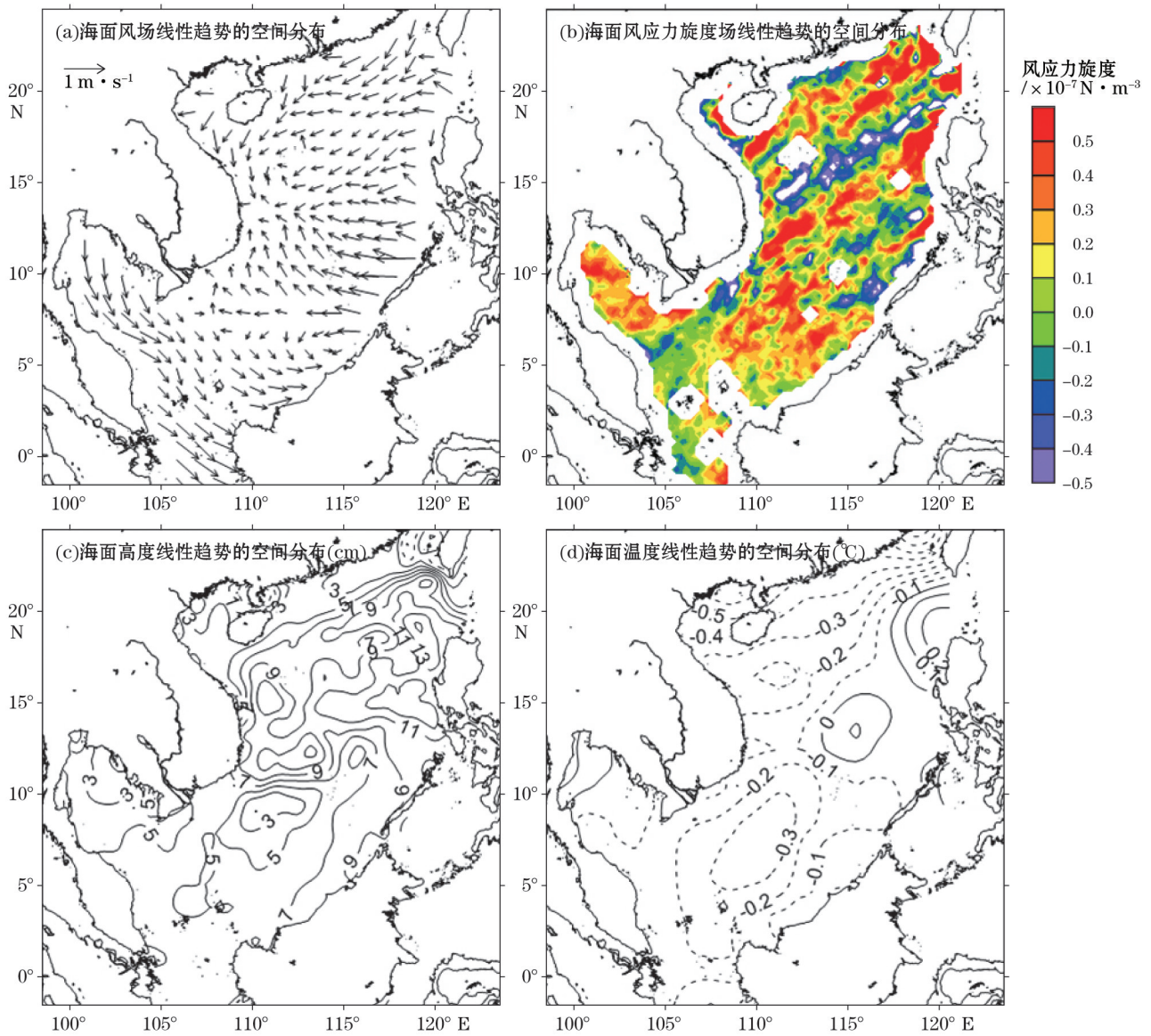


图6 2002—2011年期间南海各参量线性趋势的空间分布
Fig.6 Spatial patterns of the linear trends during 2002—2011

4 年际变化

4.1 区域平均值的年际变化

为了研究各参量的年际变化,我们将对参量的时间序列与代表气候年际变化的主要指数进行超前/滞后相关性分析。这些指数包括 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$, $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$, IOD 及 EMI。其中 EMI 是 Ashok 等^[15]提出的一个新的指数,称作类厄尔尼诺指数(El Niño Modoki Index),是一种不同但类似于传统的厄尔尼诺现象,这种现象在赤道太平洋中部发生,也称中太平洋 El Niño,发生时热带太平洋海表温度呈现一种马蹄形分布,即沿赤道两侧出现相对较低的海表温度异常(SSTA)夹着赤道太平洋中部较高的 SSTA。EMI 指数与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数基

本上不相关,但与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$ 有一定的相关性^[15]。

在 2002—2011 年期间南海各参量区域平均值时间序列图(图 5)中黑色虚线给出了对应期间相关性最高的气候年际变化指数的标准化后时间序列。图 5a 为风分量与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数的时间序列对比图。相关分析表明,风东分量与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数相关系数最大为 0.56,超前 6 个月;风北分量与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数相关系数最大为 0.63,滞后 1 个月。图 5b 为海面风应力旋度与负 EMI 指数的相近序列对比图,海面风应力旋度与 EMI 指数相关系数的负最大值为 -0.85,滞后 3 个月。图 5c 为海面高度与负 EMI 指数的时间序列对比图,海面高度场与 EMI 指数相关系数的负最大值为 -0.80,滞后 2 个月。图 5d 为海表温度与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数的时间序列对比图,海面温度场与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数相关系数最大为 0.68,滞后 4 个月。我们根据 Fang 等^[11](Appendix A)提供的方法对以上相关关系进行显著性检验,结果显示其显著性水平都低于 1%。

4.2 主成分的年际变化

4.2.1 主成分分解

主成分分析(principal component analysis,PCA)也称特征向量分析或经验正交函数(empirical orthogonal function,EOF)分析,是一种分析矩阵数据中的结构特征,提取数据主要特征量的方法,最早由 Lorenz^[16]引入气象和气候研究,并在地球科学及其他学科中得到了广泛应用。本研究中我们利用 EOF 方法对各参量的观测值进行成份分解,将观测值分解成空间形态(spatial pattern)与时间函数(time coefficient function,TCF)乘积的线性组合,以便进行进一步的分析。

为研究各参量的年际变化情况,我们对原始资料进行了 12 个月滑动平均处理,去掉平均值和线性趋势值。假定位置为 $m(m=1,2,\dots,M)$,时间为 $t(t=1,2,\dots,N)$ 的参量为 $x(m,t)$,则经过 EOF 处理后就可将它分解为一系列的时间函数 $\alpha_i(t)$ 和空间函数 $F_i(m)$ 的乘积之和,即

$$x(m,t) = \sum_{i=1}^K F_i(m)\alpha_i(t), \quad (1)$$

式中, K 取 (M,N) 中较小值; i 代表第 i 个模态; α_i 即代表第 i 个模态的时间函数; F_i 代表第 i 个模态的空间形态。模态顺序是按照 $x(m,t)$ 的协方差矩阵特征值 λ_i 大小排列的, λ_i 的大小也代表了各模态的方差。为了方便对比,本文中 TCF 进行标准化处理,即满足

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i^2(t) = 1, \quad (2)$$

则相应的方差

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M F_i^2(m) = \lambda_i, \quad (3)$$

标准差为 $\sqrt{\lambda_i}$ 。表 2 为南海风场、风应力场、高度场及温度场 EOF 前三模态的方差、方差贡献率和标准差,由该表可知,所有参量的前两个模态的方差贡献率之和都超过 70%,其中第一模态的方差贡献率都超过 40%。由于第三模态贡献率相对较小,在本文中不做讨论。

在对具有东分量和北分量的海面风场资料进行 EOF 分析时,我们选取了实向量方法^[17](real-vector method),它是多变量 EOF 分析^[18](mutlivariate EOF analysis)的一种特殊情况。

表 2 南海风场、风应力旋度场、高度场及温度场 EOF 前 3 个模态的方差、方差贡献率和标准差

Table 2 Variances, contribution percentage and standard deviations of the first three EOFs of the surface wind, wind stress curl, sea surface height, and sea surface temperature of the South China Sea

参 量	模 态	方 差	方差贡献率	标准差
风 场	1	$0.064 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$	0.44	$0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	2	$0.044 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$	0.31	$0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	3	$0.015 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$	0.10	$0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
风应力旋度场	1	$3.44 \times 10^{-16} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})^2$	0.33	$1.86 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$
	2	$1.49 \times 10^{-16} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})^2$	0.14	$1.22 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$
	3	$0.97 \times 10^{-16} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})^2$	0.09	$0.98 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$
高度场	1	2.062 cm^2	0.42	1.44 cm
	2	0.842 cm^2	0.17	0.92 cm
	3	0.704 cm^2	0.14	0.84 cm
温度场	1	$0.0308 (\text{C})^2$	0.68	0.18 C
	2	$0.0065 (\text{C})^2$	0.14	0.08 C
	3	$0.0033 (\text{C})^2$	0.07	0.06 C

4.2.2 风 场

图 7 为海面风场和海面风应力旋度场的第一模态的空间分布和时间序列,由表 2 可知,风场的第一模态方差贡献率为 44%,风应力旋度的第一模态方差贡献率为 33%。由图 7a 可以看出,在南海海盆北部有一个明显的反气旋结构,中心位于吕宋岛西侧。由图 7b 可以看出,对应反气旋结构的位置存在一个反气旋中心,同时在南海北部大陆沿岸和吕宋海峡以西存在气旋性中心。图 7c 是南海海面风场 EOF 第一模态的时间序列与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$ 指数的对比图。通过对该时间序列与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$ 指数的超前/滞后相关分析得出,当风场第一模态的时间序列滞后于 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$ 指数 5 个月时,出现最大的相关系数 0.68,置信水平超过 99%。风场第一模态时间序列中较大的 4 个峰值基本上分别与 2002—2003 年、2004—2005 年、2006—2007 年和 2009—2010 年四次厄尔尼诺事件相对应。Wang 等^[19]认为,在厄尔尼诺事件发生期间,西北太平洋会出现一个反气旋异常,同时东亚冬季季风会相对减弱。南海这一模态中出现的反气旋异常实际上是西北太平洋反气旋异常的一部分,印证了 Wang 等^[19]的观点。当出现厄尔尼诺暖位相时,南海北部的东北季风将会减弱,南海南部的东北季风则所受影响较小。我们还对南海海面风场第一模态的时间序列与 EMI 指数进行超前/滞后相关计算,得出当时时间序列滞后 4 个月时出现相关系数最大值 0.58,低于与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$ 的相关系数。南海海面风应力第一模态的分布情况与风场第一模态相近。图 7d 为相应的南海海面风应力旋度第一模态的时间序列与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数的对比图,当 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 指数滞后风应力旋度第一模态时间序列 3 个月时出现相关系数最大值 0.74,置信水平也超过 99%。此外,南海海面风应力旋度场第一模态的时间序列与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3.4$ 滞后 2 个月的相关系数达到最大值 0.73,低于与 $\text{Ni}\tilde{\text{N}}\text{O}3$ 的相关系数。对以上的相关关系进行显著性检验,由结果可知其显著性水平都低于 1%。

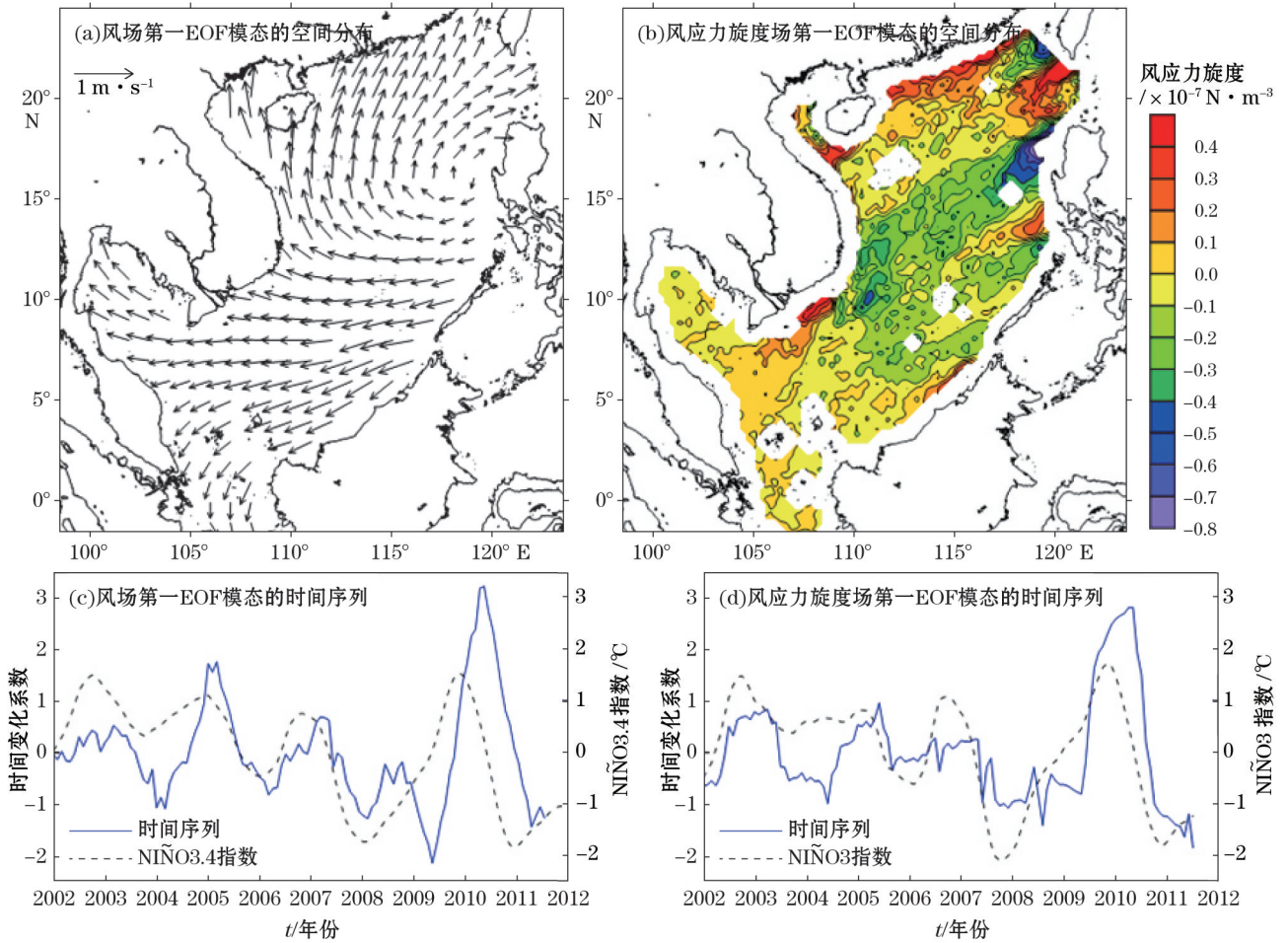


图7 南海海面风场和风应力第一 EOF 模态的空间形态和时间变化
 Fig.7 The first EOF modes of the surface wind and wind stress variability

图8为南海海面风场和海面风应力旋度场的第二模态的空间形态和时间序列,由表2可知,风场的第二模态方差贡献率为31%,风应力的第二模态方差贡献率为14%。图8a为南海海面风场第二模态空间分布情况,不同于海面风场的第一模态,由图可以看出整个南海海域并无明显涡旋,整体呈现西南风趋势,且中部风速要大于南部和北部。这表明在厄尔尼诺正位相期间东北季风会减弱、西南季风会增强。图8b为南海海面风应力旋度场第二模态空间分布情况,由图可知在吕宋海峡以西和越南沿海存在一定的气旋性结构,在西沙群岛一带出现一个反气旋中心,可能有利于西沙暖涡^[20]的形成。图8c为南海海面风场第二模态时间序列与NINO3.4的对比图,由图可见,当风场超前时间为1个月时具有最大的相关系数0.52,置信水平超过99%。图8d为相应的南海海面风应力旋度第二模态的时间序列与负IOD指数的对比图,当滞后5个月时出现相关系数负最大值-0.63,置信水平也超过99%。对上述两个相关关系进行显著性检验,由结果可知二者的显著性水平都低于1%。

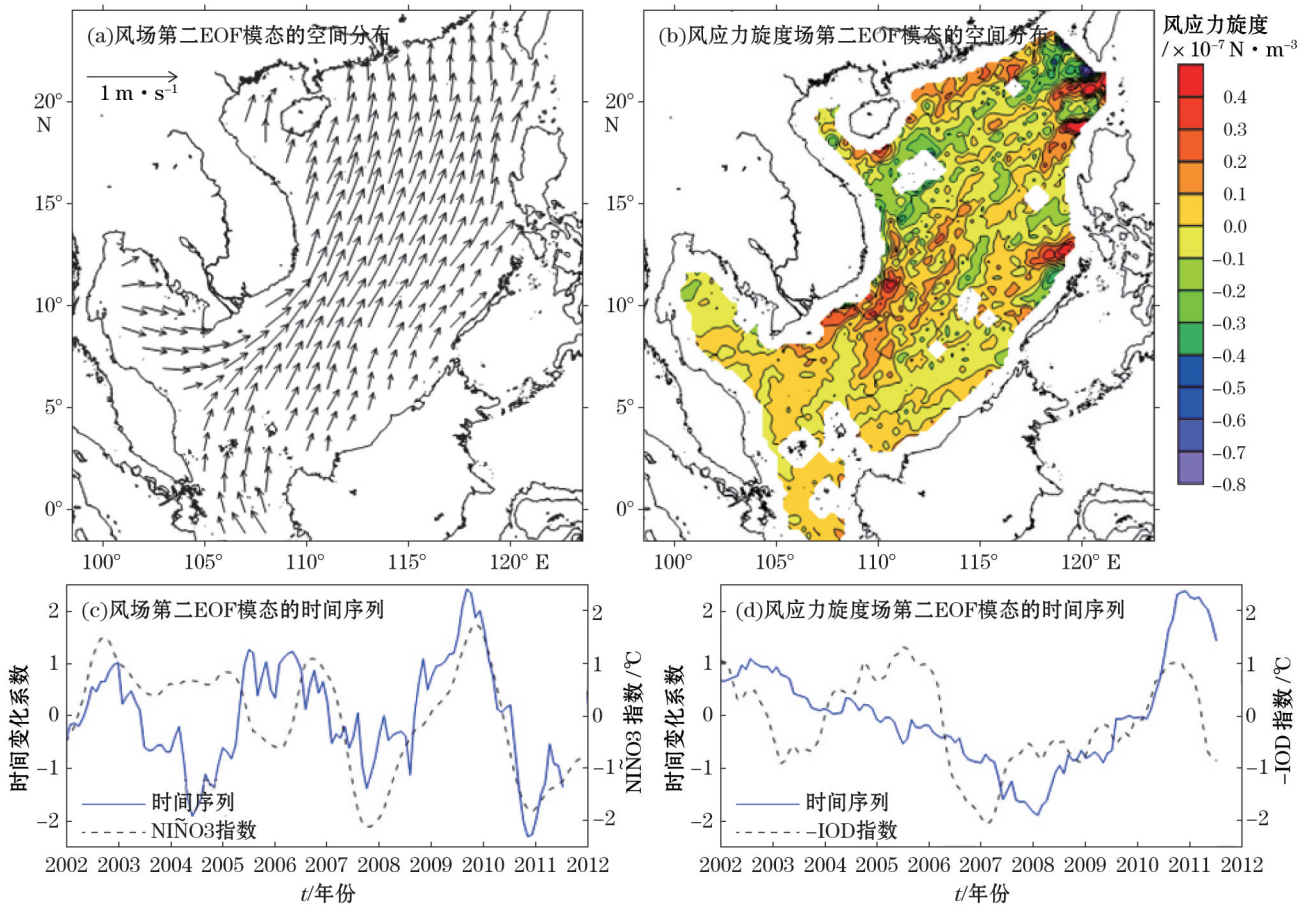


图 8 南海海面风场和风应力第二 EOF 模态的空间形态和时间变化
 Fig.8 The second EOF modes of the surface wind and wind stress variability

4.2.3 高度场

南海海面高度场第一模态的方差贡献率为 42%，第二、第三模态的方差贡献率分别为 17%和 14% (表 2)。图 9a 和图 9c 分别为南海海面高度场第一模态的空间分布和时间序列。由图 9a 可以看出，第一模态的空间形态基本上全海域为正值，极大值区域位于吕宋海峡以西和越南南部海岸，沿南中国大陆架海面高度异常值较低，分别与图 7b 中反气旋性、气旋性结构对应。由图 9c 可知，当海面高度场第一模态的时间序列滞后 EMI 指数 3 个月时，相关系数达负最大值 -0.32，相关程度较低，其显著性水平超过 10%。图 9b 和图 9d 分别为南海海面高度场第二模态的空间形态和时间序列。由图 9b 可知，海面高度异常极大值区域与图 7b 中的反气旋性结构对应，出现在西沙群岛附近和吕宋岛西侧，此外，以极大值区域为界，海面高度异常向南北两侧逐渐减小。由图 9d 可得，当海面高度场第二模态的时间序列超前 Niño3.4 指数 5 个月时，相关系数达负最大值，为 -0.37，相关程度也较低，显著性水平在 1%~5%。由此可见，南海海面高度变化受海面风应力旋度影响，反气旋性中心对应海面高度较低。海面高度与厄尔尼诺事件的关联主要表现在区域性整体的变化，并且与中太平洋厄尔尼诺相关性最高，且为负相关；亦即，当中太平洋厄尔尼诺处于正位相时，南海海面平面会降低。

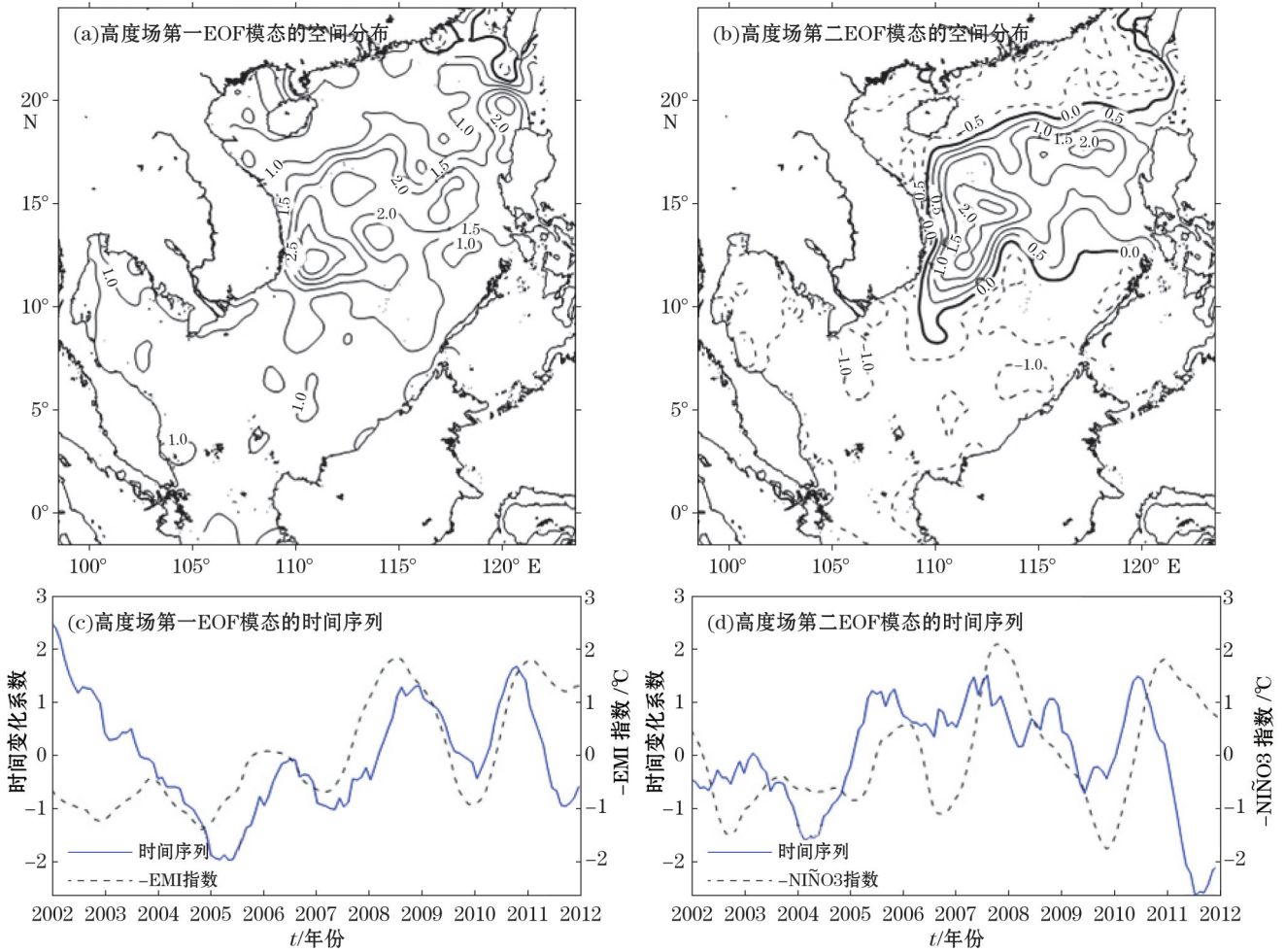


图9 南海海面高度第一和第二 EOF 模态的空间形态和时间变化

Fig.9 The first and second EOF modes of the sea surface height variability

4.2.4 温度场

南海海表温度场第一、二模态的方差贡献率分别为 68%和 14%。图 10a 和图 10c 为南海海表温度场 EOF 第一模态的空间形态图和时间序列。由图 10a 可以看出,第一模态的空间分布整体上为西高东低,最大值出现在中南半岛东南外海,反映出厄尔尼诺年第二年夏季这里的上升流会减弱。南海海表温度场第一模态的时间序列与 NINO3 指数相比(图 10c)可知,当时间序列滞后 NINO3 指数 4 个月时相关系数达到最大值 0.62,置信水平超过 99%。图 10b 为南海海表温度第二模态的空间分布图,与第一模态不同,第二模态的分布为北高南低,量值较小。由图 10d 可知,第二模态的时间序列滞后 IOD 指数 1 个月时相关系数达到最大值 0.69,置信水平也超过 99%。这两个模态的显著性水平都低于 1%。由此可见,南海海表温度年际变化主要受控于太平洋的变异,印度洋的变异对其也有一定的影响。

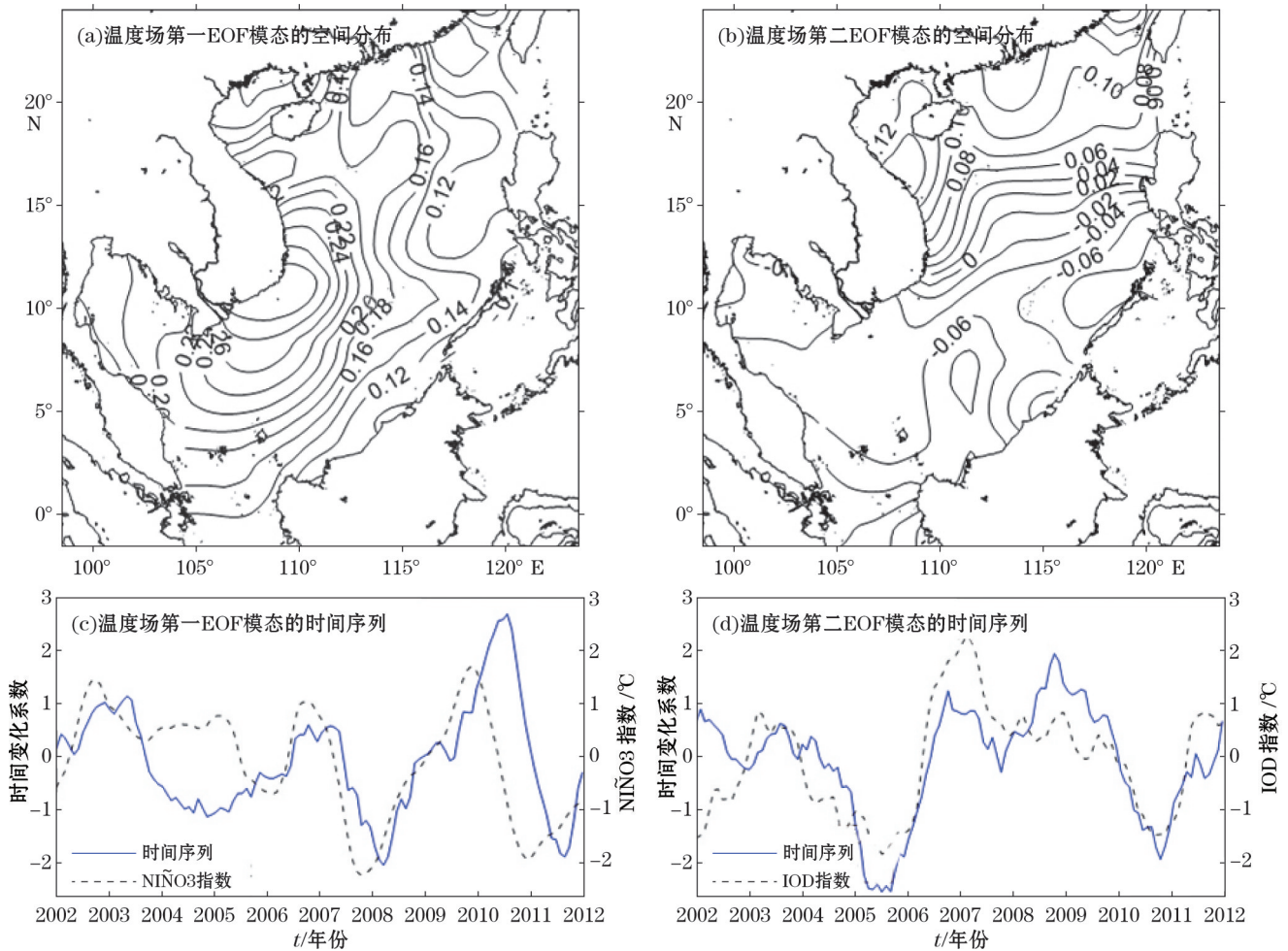


图 10 南海海表温度第一和第二 EOF 模态的空间形态和时间变化

Fig.10 The first and second EOF modes of the sea surface temperature variability

5 结 语

本文基于卫星观测资料分析了 2002—2011 年期间南海海面风场、高度场和温度场的变化趋势和年际变化特征。其中,南海区域平均海面风速东分量的线性趋势值为 $(-0.012 \pm 0.014)(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$,北分量为 $(-0.014 \pm 0.019)(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$ 。南海区域平均海面风应力旋度的线性趋势值为 $(0.099 \pm 0.33) \times 10^{-9} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \text{a}^{-1}$ 。南海区域平均海面高度的线性趋势值为 $(0.665 \pm 0.200) \text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,大约是 2005—2013 年间全球海面高度线性趋势的 2.4 倍。南海北部海盆为南海海面高度上升速率较大的区域。南海区域平均海面温度线性趋势值为 $(-0.016 \pm 0.017) \text{°C} \cdot \text{a}^{-1}$,表明近十年南海海表温度呈下降趋势,与 20 世纪末以来全球变暖的停滞相一致。南海海面温度趋势分布为东高西低,特别吕宋海峡附近出现正增温。

从本文的分析结果来看,南海海面风场、高度场和温度场的年际变化与 ENSO 变化具有一定相关性。南海海面风场 EOF 第一模态时间序列的变化比 Niño3.4 指数滞后 5 个月,二者相关系数为 0.68;比 EMI 滞后 4 个月,相关系数为 0.58。海面风应力旋度场第一模态时间序列的变化比 Niño3 指数滞后 3 个月,相关系数为 0.74。海面风场第二模态时间序列的变化比 Niño3 指数超前 1 个月,相关系数为 0.52。海面风

应力旋度场第二模态时间序列的变化比 IOD 指数滞后 5 个月,相关系数为 -0.63 。南海海面高度场 EOF 第一模态时间序列的变化比 EMI 滞后 3 个月,相关系数为 -0.32 。高度场第一模态空间分布为东高西低,在越南东南外海出现一个海面高度较高的区域。高度场第二模态时间序列的变化比 $\tilde{\text{NIÑO3}}$ 指数超前 5 个月,相关系数为 -0.37 。高度场第二模态空间分布为中部高,南北低。南海海表温度场第一模态时间序列的变化比 $\tilde{\text{NIÑO3}}$ 指数滞后 4 个月,相关系数为 0.62 。温度场第一模态空间分布为东低西高,最大值出现在中南半岛东南部。温度场第二模态的空间分布为北高南低,时间序列的变化比 IOD 指数滞后 1 个月,相关系数为 0.69 。

南海海面风场、高度场和温度场在 2002—2011 年期间的变化趋势与 1993—2003 年期间^[11]相比,一个最重大的差别是海表温度由上升转为下降,这与 20 世纪末以来全球变暖的停滞^[14]相一致。然而在这两个时期南海海面高度却在持续上升。这说明在 2002—2011 年期间虽然海表温度在下降,但海洋中的热含量仍在增加。这与新近的一些意见,认为热量进入了海洋深层^[14]相一致。从海面风场来看,在 1993—2003 年期间有西向风增强的趋势,而 2002—2011 年期间有东向风增强的趋势,这是否与海表温度的变化趋势改变有关,尚待进一步研究。

在年际变化方面,Fang 等^[11]和我们的研究都显示了南海的变异与热带太平洋的变异即使在不同时期都密切相关。Fang 等^[15]的研究仅采用 $\tilde{\text{NIÑO3.4}}$ 指数代表热带太平洋的变异,本文则更进一步研究了南海的变异与 $\tilde{\text{NIÑO3.4}}$ 、 $\tilde{\text{NIÑO3}}$ 及 EMI 指数的关系,其中 EMI 指数是新近提出的。结果发现,对于南海海表温度的年际变化,无论是区域平均还是 EOF 第一主成份,均与以 $\tilde{\text{NIÑO3}}$ 指数为代表的东太平洋厄尔尼诺相关程度最高;而对于南海海面高度的年际变化,无论是区域平均还是 EOF 第一主成份,均与以 EMI 指数为代表的中太平洋厄尔尼诺相关程度最高,而且呈负相关关系。这说明控制南海海表温度和海面高度的主要热力和动力机制应当有所不同,值得进一步研究。

参考文献(References):

- [1] CHAO S Y, SHAW P T, WU S Y. El Niño modulation of the South China Sea circulation[J].Progress in Oceanography, 1996, 38(1): 51-93.
- [2] WU C R, SHAW P T, CHAO S Y. Seasonal and interannual variations in the velocity field of the South China Sea[J].Journal of Oceanography, 1998, 54(4):361-372.
- [3] LIANG W D, JAN J C, TANG T Y. Climatological wind and upper ocean heat content in the South China Sea[J].Acta Oceanography, 2000, 38:91-114.
- [4] HWANG C, CHEN S A. Circulation and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry[J].Journal of Geophysical Research:Oceans, 2000, 105(C10):23943-23965.
- [5] HO C R, KUO N J, ZHENG Q, et al. Dynamically active areas in the South China Sea detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data[J].Remote Sensing of Environment, 2000, 71(3):320-328.
- [6] LI L, XU J D, CAI R S. Trends of sea level rise in the South China Sea during the 1990s: An altimetry result[J].Chinese Science Bulletin, 2002, 47(7):582-585.
- [7] CHU P C, LU S H, CHEN Y C. Temporal and spatial variabilities of the South China Sea surface temperature anomaly[J].Journal of Geophysical Research:Oceans, 1997, 102(C9):20937-20955.
- [8] KLEIN S A, SODEN B J, LAO N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge [J].Journal of Climate, 1999, 12(4): 917-932.
- [9] WANG D X, XIE Q, DU Y, et al. The 1997—1998 warm event in the South China Sea[J].Chinese Science Bulletin, 2002, 47(14): 1221-1227.
- [10] LIU Q Y, JIANG X, XIE S P, et al. A gap in the Indo-Pacific warm pool over the South China Sea in boreal winter: Seasonal development and interannual variability[J].Journal of Geophysical Research:Oceans, 2004, 109(C7):101-111.
- [11] FANG G H, CHEN H Y, WEI Z X, et al. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height, and

- surface temperature in the recent decade[J].*Journal of Geophysical Research Part 2006*, 111(C11):1-16.
- [12] CHURCH J A, WHITE N J, COLEMAN R, et al. Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950–2000 period [J].*Journal of Climate*, 2004, 17(13):2609-2625.
- [13] FENG W, ZHONG M, XU H Z. Global sea level changes estimated from satellite altimetry, satellite gravimetry and Argo data during 2005-2013[J].*Progress in Geophysics*, 2014, 29(2):471-477. 冯伟, 钟敏, 许厚泽. 联合卫星测高、卫星重力和海洋浮标资料研究 2005-2013 年的全球海平面变化[J].*地球物理学进展*, 2014, 29(2):471-477.
- [14] MEEHL G A, ARBLASTER J M, FASULLO J T, et al. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods[J].*Nature Climate Change*, 2011, 1(7):360-364.
- [15] ASHOK K, BEHERA S K, RAO S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection[J].*Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2007, 112(C11):C11007.
- [16] LORENZ E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction[J].*Science Report*, 1956, 409(2):997-999.
- [17] KAIHATU J M, HANDLER R A, MARMORINO G O, et al. Empirical orthogonal function analysis of ocean surface currents using complex and real-vector methods[J].*Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(4):927-941.
- [18] PICAUT J, HACHKERT E, BUSALACCHI A J, et al. Mechanisms of the 1997-1998 El Niño-La Niña, as inferred from space-based observations[J].*Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2002, 107(C5):3037.
- [19] WANG B, WU R, FU X. Pacific-East Asian teleconnection; How does ENSO affect East Asian climate?[J].*Journal of Climate*, 2000, 13(9):1517-1536.
- [20] CHU X, XUE H, QI Y, et al. An exceptional anticyclonic eddy in the South China Sea in 2010[J].*Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2014, 119(2):881-897.
- [21] LIAN Z, FANG G H, WEI Z X, et al. A comparison of wind stress datasets for the South China Sea[J].*Ocean Dynamics*, 2015, 65(5):721-734.
- [22] XIE S P, XIE Q, WANG D, et al. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations[J].*Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2003, 108(C8):343-367.

Trends and Interannual Variability of the South China Sea Surface Winds, Surface Height and Surface Temperature in the Recent Decade

WANG Jia-ying¹, FANG Guo-hong^{1,2,3}, WANG Yong-gang^{1,2,3}

(1. *The First Institute of Oceanology, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)*

Abstract: The monthly products of the surface winds (SW), sea surface height (SSH) and sea surface temperature (SST) of the South China Sea (SCS) from satellite observations during 2002–2011 are used to analyze trends and interannual variability. Time series are smoothed with a 12-month running mean filter. The linear trends of the east and north components of the regional mean SW, wind stress curl, SSH and SST are $(-0.012 \pm 0.014)(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$, $(-0.014 \pm 0.019)(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{a}^{-1}$, $(0.099 \pm 0.33) \times 10^{-9}(\text{N} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \text{a}^{-1}$, $(0.665 \pm 0.200) \text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$, $(-0.016 \pm 0.017) \text{°C} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The interannual variability of regional mean SW, wind stress curl, SSH and SST correlates with NIÑO3, EMI (El Niño Modoki Index), EMI and NIÑO3 with coefficient of about 0.6, -0.85, -0.80 and 0.68, and with lag of 1, 3, 2 and 4 months, respectively. The negative warming rate of the SCS SST is consistent with the global warming hiatus since the end of the last century. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis shows that the first EOF of the SW is characterized by a basin-wide anticyclonic pattern. The corresponding time coefficient function (TCF) correlates with the NIÑO3.4 index at the 99% confidence level (correlation coefficient=0.68), with a lag of 5 months. The first EOF of the SSH is characterized by high sea level along the east boundary and east of Vietnam. The corresponding TCF correlates with the EMI with a coefficient of -0.32 and a lag of 3 month. The first EOF of the SST is characterized by high values in the west and low values in the east. The corresponding TCF correlates with NIÑO3 index at 99% confidence level (correlation coefficient=0.63), with a lag of 4 months.

Key words: South China Sea; trends; interannual variability

Received: February 29, 2016