

张萍,徐峰,涂石飞,等.1979—2017年南海 SSTA 时空特征及其与沃克环流异常的相关[J].海洋气象学报,2019,39(1): 15-25.

ZHANG Ping, XU Feng, TU Shifei, et al. Spatial and temporal characteristics of the SSTA in the South China Sea from 1979 to 2017 and its correlation with the Walker circulation anomaly[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 15-25. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.002. (in Chinese)

## 1979—2017年南海 SSTA 时空特征及其与沃克环流异常的相关

张萍<sup>1,3</sup>,徐峰<sup>1,2</sup>,涂石飞<sup>1,2</sup>,季倩倩<sup>1,2</sup>,陈思奇<sup>1,2</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. 广东海洋大学南海海洋气象研究院,广东 湛江 524088;3. 中国科学院大气物理研究所,北京 100029;4. 广东省气候中心,广东 广州 510640)

**摘要:** 利用 1979—2017 年 HadISST 月平均海面温度资料、ERA-Interim 大气资料以及 GPCP Version 2.3 集合降水资料,分析了南海海面温度距平(SSTA)场的时空分布特征,并从南海降水异常的角度探讨了在 ENSO 期间,沃克(Walker)环流异常对南海海面温度异常(SSTA)的影响过程。结果表明,南海 SSTA 场分别存在全海域一致模态、东西反位相的偶极子模态以及纬向三级子正负位相三个主要模态,且三个模态都具有显著的准 2 a 及 4 a 左右的年际振荡周期,反映了南海 SSTA 与 ENSO 现象的高度相关性。对 Walker 环流异常的分析表明,Walker 环流异常与 ENSO 事件及南海 SSTA 存在较好的相关。ENSO 事件发生时,Walker 环流异常移动通过“云辐射反馈过程”,使得南海海面温度(SST)发生改变,因此 Walker 环流在 ENSO 影响南海 SST 异常过程中起到“大气桥”的作用。

**关键词:** 南海 SSTA; 时空分布; ENSO; Walker 环流; 相关分析

**中图分类号:** P466 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0015-11

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.002

## Spatial and temporal characteristics of the SSTA in the South China Sea from 1979 to 2017 and its correlation with the Walker circulation anomaly

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

(1. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. South China Sea Institute of Marine Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Guangdong Climatic Center, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** The spatial and temporal variations of the sea surface temperature anomaly (SSTA) in the South China Sea (SCS) are analyzed and the influencing process of the Walker circulation anomaly on the SSTA in the SCS during the ENSO period is discussed from the perspective of the precipitation anomaly by using monthly mean sea surface temperature (SST) provided by HadISST, ERA-Interim reanalysis data, and GPCP Version 2.3 Combined Precipitation Data Set. The results show that the SSTA field in the SCS has three major modes, including the homogenous structure mode, the eastwest out-of-phase dipole mode, and zonal triple mode. The three modes have significant quasi-biennial oscillation and

收稿日期:2018-09-10; 修订日期:2018-12-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0605604);国家自然科学基金项目(41475120);国家级大学生创新创业项目(CXXL2016010);广东省自然科学基金重大基础研究培育项目(2015A03030801)

作者简介:张萍,女,硕士研究生,主要从事海洋气象研究,zhangping181@mails.ucas.ac.cn。

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。

quasi-quadrennial oscillation, which reflects a high correlation between the SSTA in the SCS and the ENSO phenomenon. And the analysis of the Walker circulation anomaly shows that the Walker circulation anomaly has a good correlation with the ENSO phenomenon and the SSTA in the SCS. When the ENSO event occurs, the anomalous movement of the Walker circulation changes the SST in the SCS through “cloud-radiation feedback process”. The Walker circulation acts as an “atmospheric bridge” during ENSO’s influence on the SSTA in the SCS.

**Key words** SSTA in the South China Sea; spatial and temporal distribution; ENSO; the Walker circulation; correlation analysis

## 引言

南海具有独特的地理位置,地处西太平洋与东印度洋交汇处,是海气相互作用敏感区域之一,且对我国长江中下游和华南地区旱涝有显著影响。因此研究南海海面温度(Sea Surface Temperature, SST)时空振荡,并探讨其变化原因,对进一步了解南海海气相互作用具有重要意义。对南海 SST 研究最早始于 20 世纪 90 年代初,周发琇和于慎余<sup>[1]</sup>基于几个海洋水文气象站观测数据分析了以西沙为代表的南海 SST 年际变化特征。在此基础上,一些学者<sup>[2-4]</sup>还探讨了南海 SST 年际振荡与 ENSO 的关系。随着资料分辨率的提高,很多学者<sup>[5-6]</sup>研究了南海 SST 年代际振荡及长期变化趋势。

对于南海 SST 的变化原因,前人也从各个角度对其进行了探讨。现有研究大都集中在海面风场以及海面净得热对南海 SST 的影响<sup>[3,7-8]</sup>。1996 年 LAU<sup>[9]</sup>提出了沃克(Walker)环流在太平洋海温异常与其他偏远热带海洋 SST 的联系中起到了“大气桥梁”的作用。随后很多学者<sup>[10-11]</sup>基于分辨率更高的资料,对此物理过程进行了证实。因此探讨 Walker 环流影响南海 SST 的物理过程,对进一步理解南海 SST 的变化原因具有重要意义。

本文利用 1979—2017 年海洋、大气、降水资料以及更优化的分析方法研究南海 SST 的时空振荡特征,并对 Walker 环流在 ENSO 影响南海 SST 的物理过程进行初步探讨。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本研究使用资料为 1979 年 1 月—2017 年 12 月,主要包括英国 Hadely 中心(HadISST)逐月全球海面水温,分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ <sup>[12]</sup>;欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA-Interim 风场资料,分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ <sup>[13]</sup>;美国国家海洋大气管理局(NOAA)

GPCP Version 2.3 Combined Precipitation Data Set 资料,分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ <sup>[14]</sup>;NOAA 提供的 Niño3.4 指数,下载于 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>。

### 1.2 方法

首先利用经验正交函数分解法(EOF)分析近 40 a 南海海面温度距平场(sea surface temperature anomaly, SSTA)的时空分布特征,其次运用小波分析估计南海海面温度的振荡周期,之后采用时滞相关得到南海 SST 与 ENSO 事件及与 Walker 环流的相关关系,最后利用加权合成分析得到降水异常分布和 Walker 环流异常的关系,探讨影响南海 SST 变化的原因。下面将对加权合成分析方法及表征 Walker 环流的纬向质量流函数法进行详细介绍。

#### 1.2.1 加权合成分析

合成分析(CA)是指在定义一些特殊事件后,CA 可以利用事件发生的时间节点有效提取出与事件有关的其他物理量信号。但在 CA 中,正负事件定义标准的宽严度选取导致了合成标准的极强人为性。

XIE et al.<sup>[15]</sup>对此进行改进并提出加权合成分析。相比合成分析而言,加权合成分析具有更高信噪比和客观性,即使用所有正负异常年样本,并采用一个可变权重,来突出异常事件的作用。考虑到权重选择的客观性,在此根据统计理论给出一个相对合适的定义。新定义一个加权求和式作为算法,然后将原始场变量和新定义的分析变量求残差,并使残差与参考指数的协方差为 0,从而求得权重,即:

$$\begin{aligned} & \sum (I_i - \bar{I})(F_i - \bar{F} - (F_a - \bar{F}_a)) = \\ & \sum (I_i - \bar{I})(F_i - \sum C_k \cdot F_k) = \\ & \sum [I_i - \bar{I} - (\sum (I_k - \bar{I}))C_i]F_i = 0, \quad (1) \end{aligned}$$

式中  $I$  为参考指数,  $F$  为物理量场,  $F_a$  为分析变量场,  $I_i$  和  $F_i$  分别表示第  $i$  个时间点的  $I$  和  $F$ ,  $\bar{I}$ ,  $\bar{F}$  和  $\bar{F}_a$  分别是  $I$ ,  $F$  和  $F_a$  的平均值,  $C_i$  是第  $i$  个权重

系数。

定义正异常事件为所有大于平均值情况的事件,权重中小于平均值部分统统设为 0,则得到表达式:

$$C_i = \frac{I_{i+}}{\sum I_{i+}}, I_{i+} = \begin{cases} I_i - \bar{I}, & I_i > \bar{I} \\ 0, & I_i \leq \bar{I} \end{cases} \quad (2)$$

用同样的方式定义负异常年情形,最终,正、负异常合成以及合成差分别为  $P$ 、 $N$ 、 $D$ ,即:

$$P = \frac{\sum I_{i+} F_i}{\sum I_{i+}}, N = \frac{\sum I_{i-} F_i}{\sum I_{i-}},$$

$$D = P - N = \frac{\sum I_{i+} F_i}{\sum I_{i+}} - \frac{\sum I_{i-} F_i}{\sum I_{i-}} = \frac{\sum (I_i - \bar{I}) F_i}{\sum |I_i - \bar{I}|/2},$$

$$I_{i-} = \begin{cases} 0, & I_i \geq \bar{I} \\ I_i - \bar{I}, & I_i < \bar{I} \end{cases} \quad (3)$$

新方法对合成分析重新赋权,故称为加权合成分析。由于其用到了所有样本,且各样本不平权,因此相对于合成分析而言,其具有更高的信噪比和客观性。

### 1.2.2 纬向质量流函数表征方法

一般情况下,水平风场可以分解为旋度风和散度风两部分,即:

$$\bar{V} = \bar{V}_\psi + \bar{V}_\chi \quad (4)$$

式中  $\bar{V}_\psi$  是旋度风,  $\bar{V}_\chi$  是散度风,下标  $\psi$  和  $\chi$  分别代表流函数和势函数,其中,

$$u_\chi = \frac{\partial \chi}{\partial x}, v_\chi = \frac{\partial \chi}{\partial y}, v_\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \partial \psi = - \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (5)$$

本文将采用纬向质量流函数 ( $\psi$ ),即自边界层至某高度范围内的纬向质量输送的积分量<sup>[19]</sup>,对于某格点处的纬向环流可定义为:

$$\psi = - \frac{1}{g} \int_{z_0}^z \rho u_\chi dy dz \quad (6)$$

将准静力关系:  $\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$  代入上式,可得气压坐标系下的纬向质量流函数:

$$\psi = - \frac{1}{g} \int_{p_0}^p u_\chi dy dp \quad (7)$$

式中  $\psi$  表示纬向质量流函数,  $u_\chi$  表示纬向散度风分量,  $p_0$  表示底层压强(取 1 000 hPa),  $p$  为所计算的位势高度层压强,  $dx$  和  $dy$  分别表示格点长度对应的纬向和经向宽度,文中所用 ERA-Interim 数据为 0.5 个经纬度对应的宽度,180°有 360 个网格距,分别有:

$$dx = \frac{\pi R \cos \varphi}{360}, dy = \frac{\pi R}{360} \quad (8)$$

式中  $R$  为地球半径,  $\varphi$  代表纬度。将  $dy$  代入上式可得球面气压坐标系的纬向质量流函数:

$$\psi = - \frac{\pi R}{360 g} \int_{p_0}^p u_\chi dp \quad (9)$$

$\chi$  满足泊松方程:

$$\nabla^2 \chi = - \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (10)$$

给定水平速度场可以唯一地求出  $\chi$ ,从而求出  $\bar{V}_\chi$ 。

计算时将 5°S~5°N 之间的纬向散度风进行平均,按上式垂直积分 100~1 000 hPa 的 27 个等压面层的纬向散度风,乘以常数得到赤道地区的纬向质量流函数。

## 2 南海 SSTA 时空分布特征

由 39 a 逐月 SST 数据得到气候态的月平均 SST,再用逐月 SST 减去气候态月平均值,从而得到海面温度异常值(SSTA)。对其做 EOF 分析,得到南海 SSTA 前五模态的方差贡献率(表 1),经计算,前四模态均能通过 North 检验<sup>[16]</sup>。由表 1 可见, EOF 前三模态累积方差贡献率已达 62.85%,故仅讨论前三模态时空分布特征。

表 1 南海 SSTA 的 EOF 前 5 个模态的方差贡献率

Table 1 Variance contribution rate of the first five leading EOFs for the SSTA in the South China Sea %

模态	方差贡献率	累计方差贡献率
模态 1	37.42	37.42
模态 2	16.15	53.57
模态 3	9.28	62.85
模态 4	4.82	67.67
模态 5	3.12	70.79

### 2.1 第一模态时空分布特征

第一模态空间分布如图 1a 所示,南海全海域呈同位相分布,最大正值中心位于南海中部(10°~17°N, 108°~115°E),以舌状沿东北西南延伸。由图 1b 可见,第一模态时间系数呈明显上升走势,结合空间分布场,表明南海 SST 具有增温现象,这也与全球变暖趋势相一致。此外,由图可见第一模态时间系数具有明显的年际变化,且南海 SSTA 的变化明显滞后于 Niño3.4 指数。对时间系数进行小波分析,由南海 SSTA 的小波实部(图 1c)及小波

全谱(图 1d)表明,第一模态呈显著的准 2 a 和 3~6 a 的振荡周期,且通过 95% 的显著性检验。

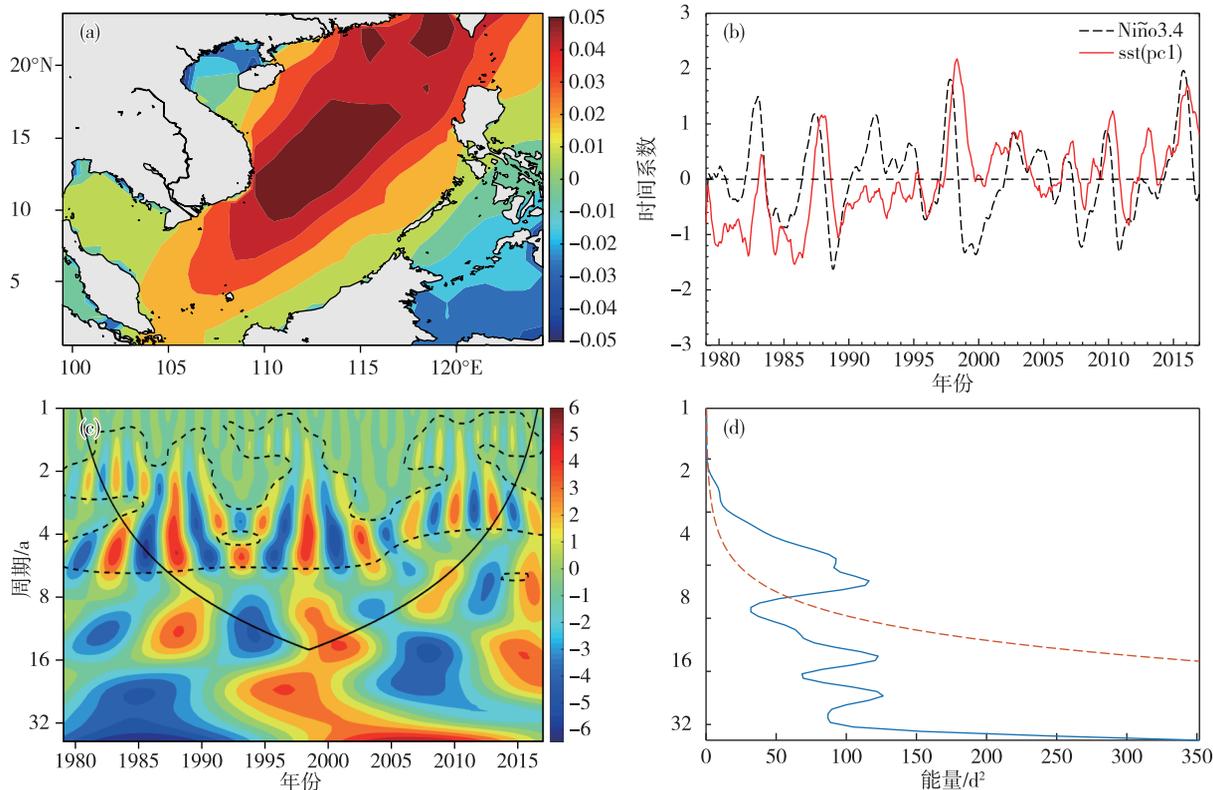


图 1 南海 SSTA 场 EOF 第一模态的空间分布(a;单位:°C)及时间系数(b;红实线代表 SSTA 第一模态的时间系数,黑虚线代表 Niño3.4 指数)、小波实部(c;锥形区域以内为可信部分,虚线以内通过 95% 显著性检验)、小波全谱(d;红虚线以上部分为通过 95% 显著性检验的周期)

Fig.1 Spatial distribution (a; units: °C), time coefficient (b; the red solid line represents the time coefficient of the first mode of the SSTA, the black dashed line represents the Niño 3.4 index), wavelet real part (c; the conical area is the credible part, the area inside the dotted line passes the 95% significance test), and wavelet full spectrum (d; the upper part above the red dashed line is the period that passes the 95% significance test) of the first EOF mode for the SSTA in the South China Sea

## 2.2 第二模态时空分布特征

南海 SSTA 第二模态空间分布如图 2a 所示,全海域呈现以 112.5°E 为 0 等值线,以东为负,以西为正的偶极子分布。其中,最大正值中心在 19°~21°N、106°~108°E 区域,即位于北部湾海域,负值中心在 22°~25°N、116°~118°E 区域,即台湾岛的西南部海域。结合时间系数的变化(图 2b)可知,时间系数为正,南海 SST 呈现为西暖东冷;时间系数为负,南海 SST 呈现为西冷东暖。此外,第二模态时间系数呈现比较明显的年际振荡,并与 Niño3.4 指数有较好的一致性,基本为同期变化。由小波分析(图 2c、d)可见,南海 SSTA 第二模态具有显著的准 2 a 和 6 a 的振荡周期。

## 2.3 第三模态时空分布特征

南海 SSTA 第三模态空间分布如图 3a,全海域呈纬向三极子正负位相分布,且负值区占据南海的大部分海域。最大负值中心位于 23°~25°N、

115°~120°E,正值区域较弱。结合第三模态时间系数的变化(图 3b),时间系数为正时,南海 SST 自北向南呈低高低的分布;时间系数为负时,其变化恰好相反。此外,其时间系数也呈明显的年际振荡。由小波分析(图 3c、d)可见,南海 SSTA 第三模态在 2000 年之前具有准 2 a 及 4 a 的振荡周期,2000 年之后振荡周期不明显。

由分析可知,南海 SSTA 前两模态振荡周期为 2~6 a,考虑到 El Niño 振荡周期为 2~7 a,因此南海 SSTA 较好地反映了 El Niño 现象。为进一步证实前两模态与 ENSO 的相关,本文将南海 SSTA 前两模态的时间系数与 Niño3.4 指数进行了时滞相关分析(图 4),负(正)值表示南海 SSTA 滞后(超前)于 Niño3.4 指数,可见南海 SSTA 第一模态在滞后于 Niño3.4 指数 5 个月时与其达到最大正相关(0.41),第二模态与 Niño3.4 指数同期相关,相关系数高达 0.52,且都通过了 99.9% 的显著性检验。即

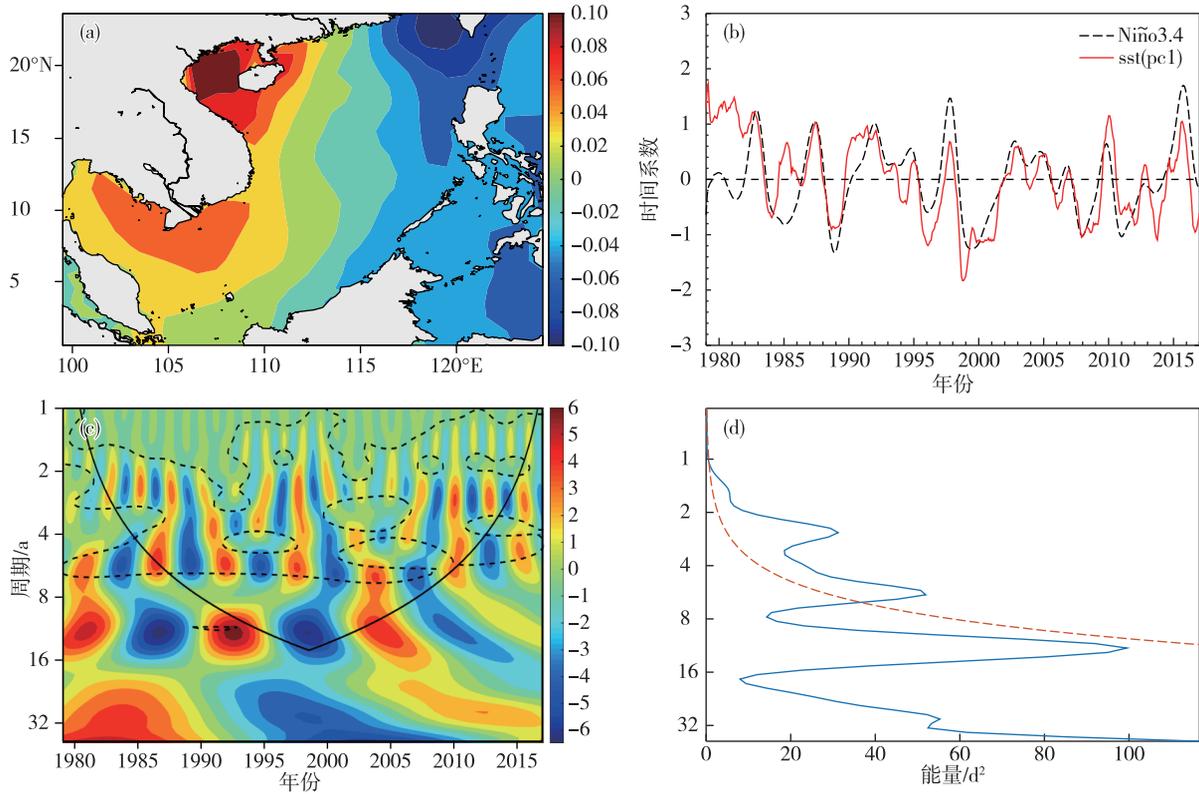


图 2 南海 SSTA 场 EOF 第二模态的空间分布 (a; 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 及时间系数 (b; 红实线代表 SSTA 第二模态的时间系数, 黑虚线代表 Niño3.4 指数)、小波实部 (c; 锥形区域以内为可信部分, 虚线内区域通过 95% 显著性检验)、小波全谱 (d; 红虚线以上部分为通过 95% 显著性检验的周期)

Fig.2 Spatial distribution (a; units:  $^{\circ}\text{C}$ ), time coefficient (b; the red solid line represents the time coefficient of the second mode of the SSTA, the black dashed line represents the Niño 3.4 index), wavelet real part (c; the conical area is the credible part, the area inside the dotted line passes the 95% significance test), and wavelet full spectrum (d; the upper part above the red dashed line is the period that passes the 95% significance test) of the second EOF mode for the SSTA in the South China Sea

当 El Niño 发生时, 南海 SST 同期表现为西暖东冷, 在其 5 个月后, 南海 SST 出现全海盆增暖的现象。

### 3 南海 SSTA 与 Walker 环流异常的相关

由上述分析得知, 南海 SSTA 滞后于 El Niño 5 个月。El Niño 是由于赤道中东太平洋海温持续增暖而产生的, 当 El Niño 发生时, 赤道太平洋 Walker 环流必将受到影响, 进而对南海 SST 起作用。为了讨论 Walker 环流和南海 SST 的联系, 本文采用质量流函数<sup>[17]</sup>分析 Walker 环流的时空分布。

#### 3.1 Walker 环流的气候态分布

图 5 表示 Walker 环流的气候态分布。这里取对流层顶高度为 100 hPa<sup>[18]</sup>。如图所示, 自西向东共有正反环流交替出现的 6 个纬向环流圈, 位置分别与太平洋、美洲大陆、大西洋、非洲大陆、印度洋相对应。太平洋上空为强度最强、跨度最大, 中心偏高的顺时针正环流圈; 100°~60°W 之间的美洲热

带为强度较强, 中心偏低的逆时针反环流圈; 大西洋上空为强度较弱的顺时针正环流圈; 非洲大陆上空为强度较强, 中心偏高的逆时针反环流圈; 非洲大陆西部海域对应强度较弱, 中心偏低的顺时针正环流圈; 印度洋上空为强度较强, 中心偏高的逆时针反环流圈。

#### 3.2 Walker 环流时空分布

EOF 分析 Walker 环流得到前五模态的方差贡献率如表 2 所示, 前两模态的方差贡献率分别为 58.09% 和 18.61%, 已包括了 Walker 环流场 76.70% 的信息, 因此, 本文主要讨论其前两个模态的时空分布特征。

##### 3.2.1 Walker 环流第一模态时空分布特征

图 6a 为 Walker 环流第一模态空间分布。为便于比较异常环流与平均环流的关系, 图中以黑色曲线给出 Walker 环流的气候态分布, 黑色实、虚线分别代表正、反环流圈。由图可见, 第一模态为正反

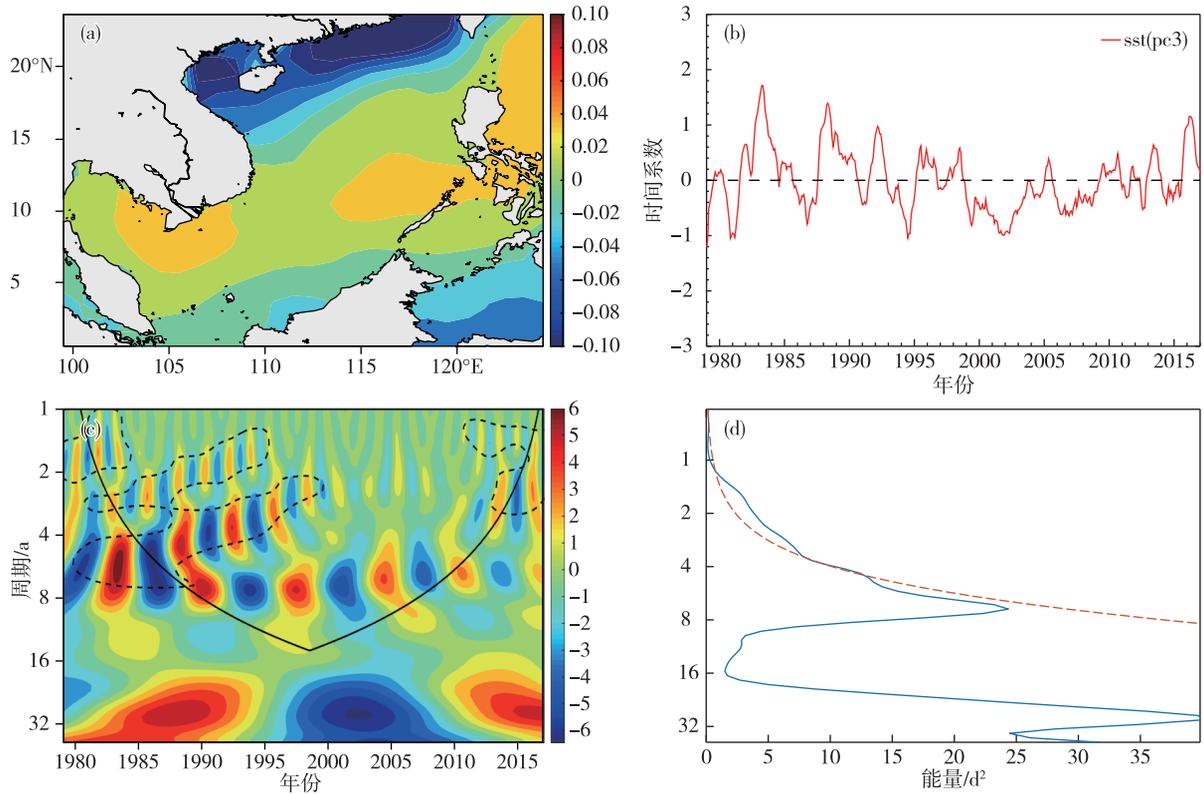


图 3 南海 SSTA 场 EOF 第三模态的空间分布(a;单位:℃)及时间系数(b)、小波实部(c;锥形区域以内为可信部分,黑虚线内区域通过 95%显著性检验)、小波全谱(d;红虚线以上部分为通过 95%显著性检验的周期)

Fig.3 Spatial distribution (a; units: °C), time coefficient (b), wavelet real part (c; the conical area is the credible part, the area inside the dotted line passes the 95% significance test), and wavelet full spectrum (d; the upper part above the red dashed line is the period that passes the 95% significance test) of the third EOF mode for the SSTA in the South China Sea

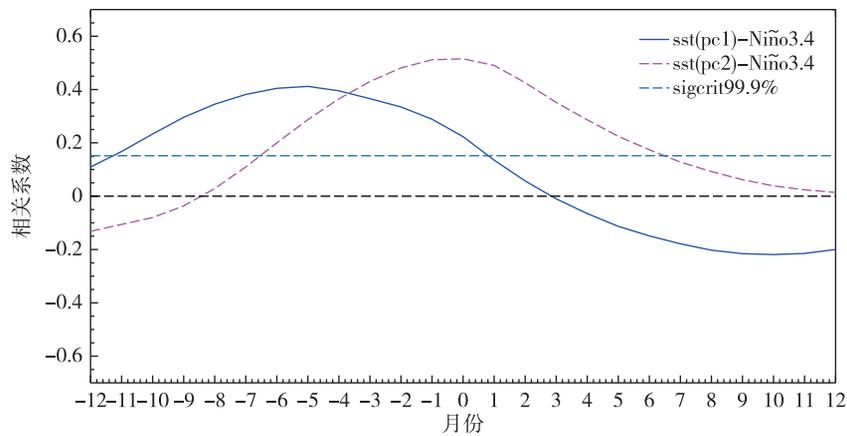


图 4 南海 SSTA 前两模态的时间系数与 Niño3.4 指数的时滞相关(横坐标为月份,负/正值表示南海 SSTA 滞后/超前于 Niño3.4 指数)

Fig.4 Lag correlation between time coefficients of the first two modes of the SSTA in the South China Sea and Niño3.4 index (the number on the X-axis is the month, the negative/positive value indicates the SSTA in the South China Sea lag/lead to the Niño 3.4 index)

环流圈的显著东移。结合图 6b 中 Walker 环流第一模态的时间系数可知,其正位相时对应 Walker 环流东移加强,相反,当其为负位相时则对应 Walker 环

流东移减弱;此外,由图可知,Walker 环流的时间系数与 Niño3.4 指数的变动基本一致。由时滞相关(图 7)可见,第一模态异常 Walker 环流与 Niño3.4

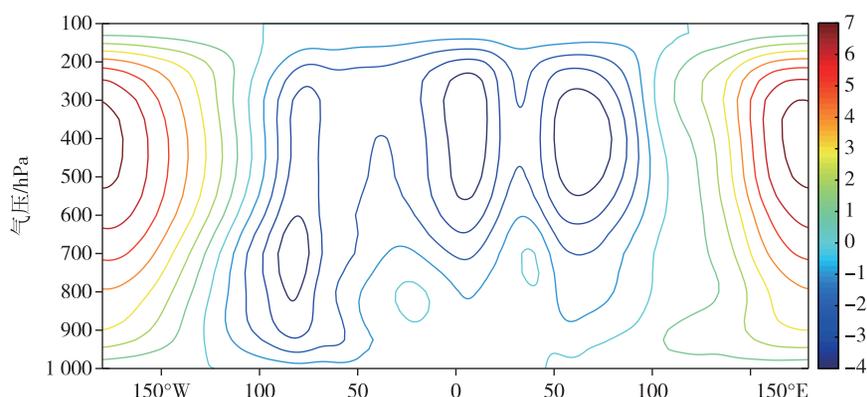


图 5 纬向质量流函数的气候态分布(单位:  $10^8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 正值表示气流在西侧上升, 东侧下沉的正环流圈, 负值表示反环流圈)

Fig.5 Climate state distribution of the zonal mass flow function (units:  $10^8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , the positive value refers to the direct circulation cell where the air flow rises on the west side and sinks on the east side, the negative value refers to the indirect circulation cell)

指数同期相关高达 0.69, 且超过了 99.9% 的显著性检验。即当 El Niño (La Niña) 发生时, Walker 环流东移增强(减弱), 因此第一模态对应了 Walker 环流异常东移。

表 2 Walker 环流的 EOF 前 5 个模态的方差贡献率

Table 2 Variance contribution rate of the first five leading EOFs for the Walker circulation %

模态	方差贡献率	累计方差贡献率
模态 1	58.09	58.09
模态 2	18.61	76.70
模态 3	5.60	82.30
模态 4	4.49	86.79
模态 5	2.58	89.37

### 3.2.2 Walker 环流第二模态时空分布特征

图 8a 为 Walker 环流第二模态空间分布, 由图可知, 第二模态为分列于  $150^\circ\text{E}$  以东和以西纬向正反环流对, 这对异常环流与赤道太平洋上空的气候态 Walker 环流分布比较一致, 结合第二模态时间系数分布(图 8b), 则正位相对应 Walker 环流加强, 负位相对应 Walker 环流减弱, 因此第二模态对应了 Walker 环流的强度变化。

计算结果表明: Walker 环流有两个主要模态, 第一模态为与 ENSO 同期相关很好的 Walker 环流正反环流圈的移动, 即 El Niño (La Niña) 发生时, Walker 环流发生东移增强(减弱); 第二模态为与 Walker 环流方向比较一致的顺时针正环流圈与逆时针反环流圈, 正(负)位相使得 Walker 环流加强(减弱)。

### 3.3 南海 SSTA 与 Walker 环流异常的关系

图 9a 为南海 SSTA 前两模态的时间系数与 Walker 环流第一模态时间系数的变化。由图可知, 南海 SSTA 第一模态明显滞后于 Walker 环流, 而南海 SSTA 第二模态则与 Walker 环流的变化基本一致(图 9b)。

分别将南海 SSTA 的前两模态与 Walker 环流第一模态进行时滞相关。如图 10 所示, 负(正)值表示南海 SSTA 的变化滞后(超前)于 Walker 环流。由图可知, 南海 SSTA 第一模态滞后于 Walker 环流异常 5 个月时与其达到最大正相关, 而第二模态与 Walker 环流异常同期相关, 且都超过 99.9% 的显著性检验。

结合南海 SSTA 前两模态的空间分布以及上文的分析可知, 当出现 El Niño 时, Walker 环流异常东移, 南海 SST 同期出现西暖东冷的偶极子异常分布, 进而使得南海 SST 滞后于 Walker 环流异常 5 个月后呈现全海盆增暖。

## 4 Walker 环流异常影响南海 SSTA 机理分析

由前文分析可知, 当 ENSO 发生时, 南海 SST 随之响应, 而 Walker 环流又与 ENSO 事件和南海 SST 密切相关, 那么 Walker 环流在二者之间起到了什么作用呢? ENSO 如何通过 Walker 环流影响到南海 SST 的呢?

根据海洋温度倾向方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} - \nabla \cdot (T \vec{V}_h) - \frac{\partial}{\partial z}(Tw) \quad (10)$$

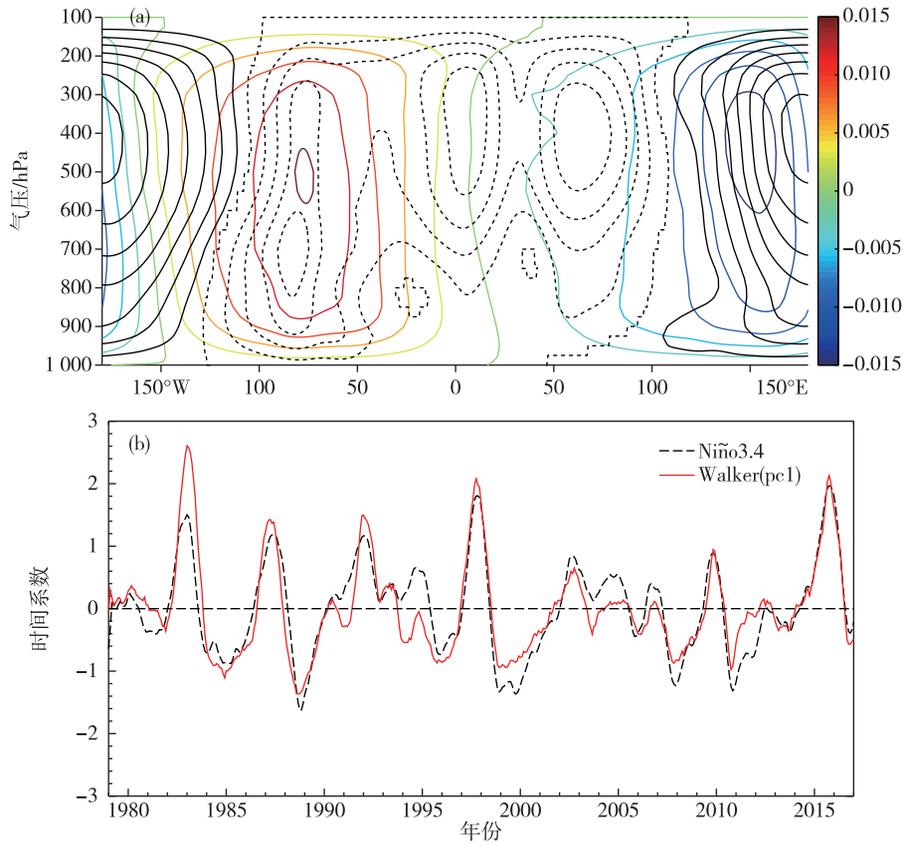


图 6 Walker 环流异常的 EOF 第一模态空间分布 (a; 单位:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 黑色曲线表示 Walker 环流的平均态, 黑实、虚线分别代表正、反环流圈) 与时间系数 (b; 红实线代表 Walker 环流异常第一模态的时间系数, 黑虚线代表 Niño3.4 指数的演变)

Fig.6 Spatial distribution (a; units:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ; the black curve represents the mean state of the Walker circulation; the black solid line and dashed lines represent the direct and indirect circulation cell, respectively) and time coefficient (b; the red solid line represents the time coefficient of the first mode of the Walker circulation anomaly, the black dashed line represents the Niño 3.4 index) of the first EOF mode for the Walker circulation anomaly

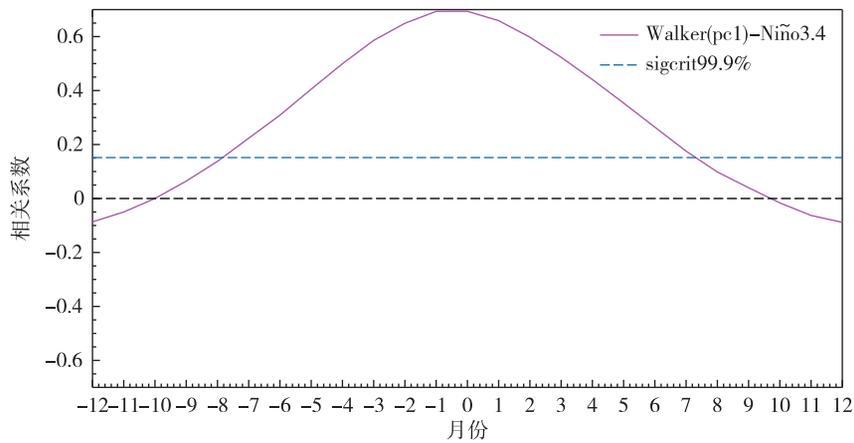


图 7 Walker 环流第一模态的时间系数与 Niño3.4 指数的时滞相关 (横坐标月份负/正值说明同图 4)

Fig.7 Lag correlation between time coefficient of the first mode of the Walker circulation and Niño3.4 index (the implications of the negative/positive values on the X-axis are the same as in Fig.4)

其中  $T$  表示温度,  $\vec{V}_h$ 、 $w$  表示流体水平和垂直速度,  $\dot{Q}$  表示非绝热加热。由式 (10) 可知, 海温的变

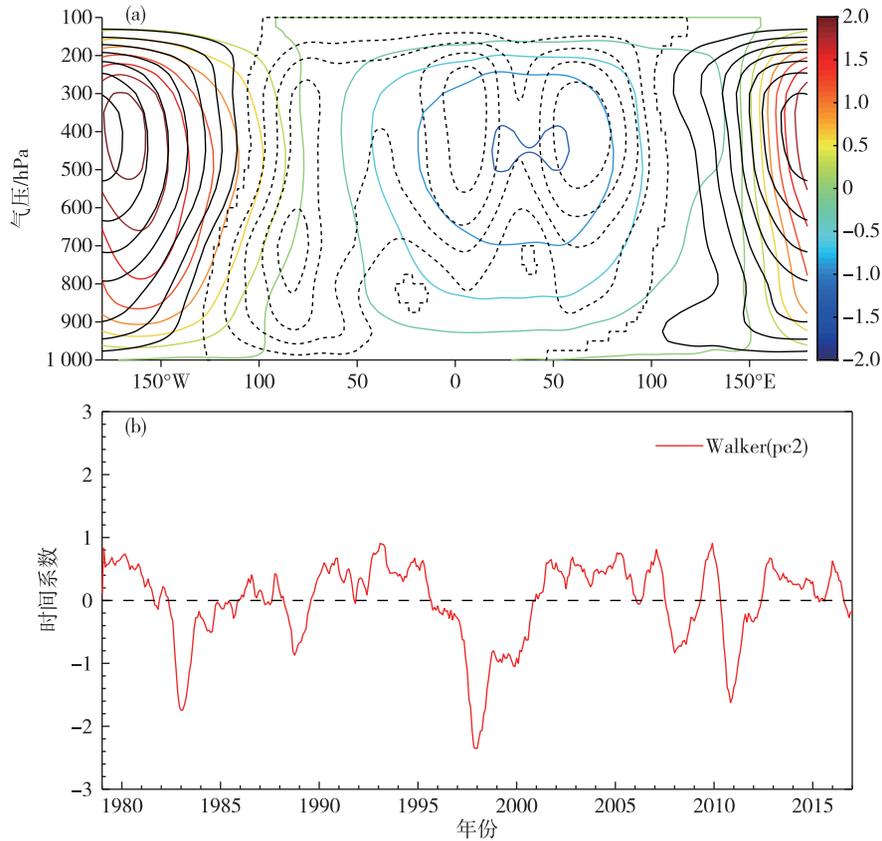


图 8 Walker 环流异常的 EOF 第二模态空间分布 (a; 单位:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 黑色曲线表示 Walker 环流的平均态, 黑实、虚线分别代表正、反环流圈) 与时间系数 (b)

Fig.8 Spatial distribution (a; units:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ; the black curve represents the mean state of the Walker circulation; the black solid line and dashed lines represent the direct and indirect circulation cell, respectively) and time coefficient (b) of the second EOF mode for the Walker circulation anomaly

化主要由海表热通量、平流输运过程、垂直输送过程来影响。前人研究表明,海表热通量是影响 SST 变化的主要动因<sup>[19]</sup>,因此,本文从南海海域降水异常的角度出发<sup>[20]</sup>,分析海表热通量变化对南海 SST 产生的影响。

20°S~30°N 降水场气候平均态分布如图 11 所示。将 20°S~30°N 间的降水场与 Walker 环流第一模态的时间系数进行加权合成分析(图 12),图 12 中彩色区域表示通过了 95% 的显著性检验。图 12a 为二者的正合场,即大于 Walker 环流第一模态时间系数均值的部分与其对应的降水场的合成,对比该区域降水场的气候平均态(图 11),可见南海降水减少;正合成减负合成得到二者的合成差(图 12b),其呈现明负相关,说明 Walker 环流异常东移,南海海域降水减少。因此,南海上空所接收的太阳短波辐射增加,南海 SST 升高。即当 El Niño 发生时,南海上空激发异常 Walker 环流,其异常下沉支会在南海形成海平面异常高压,从而抑制其上空对流云的形

成,进而使得降水减少,因此南海海面所接收到的太阳短波辐射增多,最终使得南海 SST 升高。即 Walker 环流异常通过“云辐射反馈过程”改变进入洋面的表面热通量<sup>[21]</sup>,从而影响南海 SST 的变化。因此 Walker 环流在 ENSO 影响南海 SST 的过程中扮演了“大气桥”的角色<sup>[22]</sup>。

## 5 结论

本文研究了南海 SSTA 时空分布特征及其与 Walker 环流异常的相关,并从降水异常角度出发,对 Walker 环流影响南海 SST 变化机理进行了初步探讨。结果表明:

1) 南海 SSTA 场存在全海域一致模态、东西反相的偶极子模态以及纬向三极子正负位相的三个主要模态,且都具有显著的准 2 a 及 4 a 左右的年际振荡周期,且与 ENSO 高度相关。

2) Walker 环流存在两个主要模态,第一模态对应 Walker 环流异常东移,并与 ENSO 同期相关。第

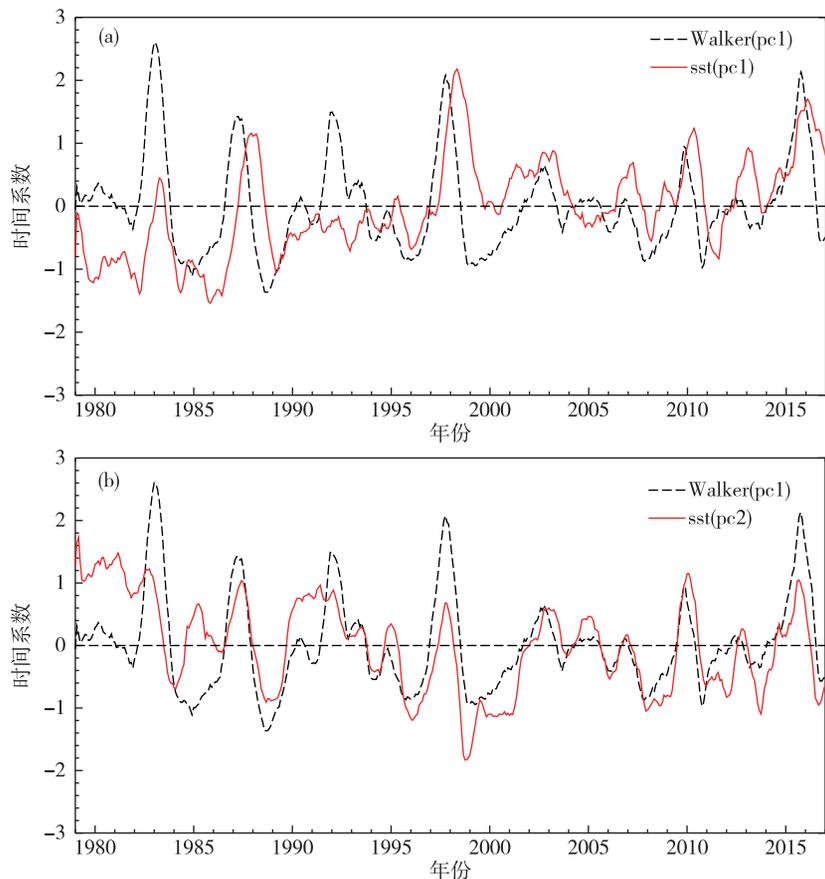


图 9 Walker 环流异常的 EOF 第一模态(黑虚线)与南海 SSTA 场 EOF 第一模态(a)、第二模态(b)的时间系数

Fig.9 Time coefficient between the first mode of the Walker circulation anomaly (the black dashed line) and the first/second (a/b) mode of the SSTA in the South China Sea

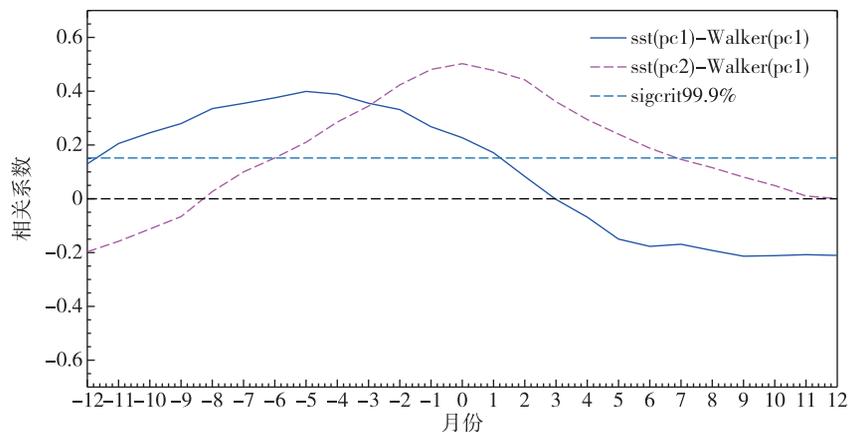


图 10 南海 SSTA 前两模态的时间系数与 Walker 环流异常第一模态的时滞相关(横坐标月份负/正值说明同图 4)

Fig.10 Lag correlation between time coefficients of the first two modes of the SSTA in the South China Sea and the first mode of the Walker circulation anomaly (the implications of the negative/positive values on the X-axis are the same as in Fig.4)

二模态对应 Walker 环流的强度变化。

3) 当 El Niño 发生时, 同期激发 Walker 环流异常东移, 导致赤道西太平洋形成异常下沉运动, 南海海面气压升高, 抑制了其上空对流云的形成, 相应出现降水减少、海面吸收太阳短波辐射增加现象, 因此南海海表面的热通量增加, 南海 SST 由西暖

东冷的偶极子分布在 5 个月后转变为全海盆一致增暖的分布, 即 Walker 环流通过“云辐射反馈过程”导致南海 SST 增温。

4) Walker 环流异常在 ENSO 影响南海 SST 过程中起到“大气桥”的作用。

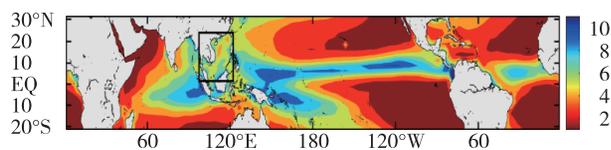


图 11 20°S~30°N 的降水场气候平均态分布(单位: mm;黑框区域表示南海海域)

Fig.11 Climate mean state distribution of the precipitation field from 20°S to 30°N (units: mm; the black box area indicates the South China Sea)

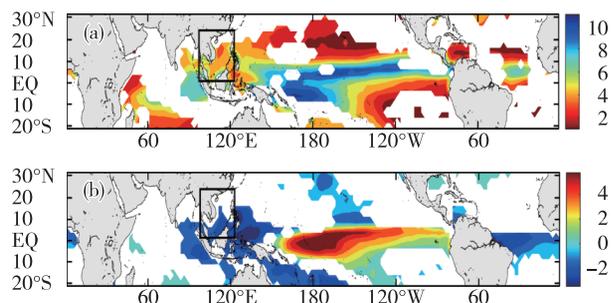


图 12 20°S~30°N 的降水场与 Walker 环流异常第一模态的正合成(a)及合成差(b)(单位:mm;黑框区域代表南海海域,彩色部分表示通过了 95% 的显著性检验)

Fig.12 Positive synthesis (a) and synthesis difference (b) of the precipitation field and the first mode of the Walker circulation anomaly from 20°S to 30°N (units: mm; the black box area represents the South China Sea and the colored area passes the 95% significance test)

## 参考文献:

- [1] 周发琇,于慎余. 南海表层水温的低频振荡[J]. 海洋学报,1991,13(3):333-338.
- [2] 于慎余,周发琇,傅刚,等. 南海表层水温低频振荡的基本特征[J]. 海洋与湖沼,1994,25(5):546-551.
- [3] 王卫强,王东晓,施平. 南海大尺度动力场年循环和年际变化[J]. 热带海洋学报,2001,20(1):61-68.
- [4] WU C, CHANG C J. Interannual variability of the South China Sea in a data assimilation model[J]. Geophys Res Lett, 2005, 32(17):109-127.
- [5] 蔡榕硕,张启龙,齐庆华. 南海表层水温场的时空特征与长期变化趋势[J]. 台湾海峡,2009,28(4):559-568.
- [6] 李芙蓉,焦梦梁. 南海海表面温度年代际异常变化特征及其与 PDO 的联系[J]. 海洋通报,2012,31(4):384-390.
- [7] 朱秀华,王卫强,周伟东,等. 南海海面温度的年际模态及其与季风强迫的关系[J]. 热带海洋学报,2003,22(4):42-50.
- [8] 曾强,张耀存. 西南季风爆发前后南海 SST 变化特征及影响因子分析[J]. 热带气象学报,2008,24(1):44-50.
- [9] LAU N C. The role of the " Atmospheric Bridge" in linking Tropical Pacific ENSO events to Extratropical SST anomalies[J]. J Climate, 1996, 9(9):2036-2057.
- [10] KLEIN S A, SODEN B J, LAU N C. Remote Sea Surface Temperature Variations during ENSO: Evidence for a Tropical Atmospheric Bridge [ J ]. J Climate, 1999, 12(4):917-932.
- [11] 刘秦玉,LIU Z Y,潘爱军. 厄尔尼诺/南方涛动与赤道远西太平洋准两年周期振荡之间相互作用的概念模式[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(1):90-97.
- [12] RAYNER N A, PARKER D E, HORTON E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [ J ]. J Geophys Res: Atmos, 2003, 108(D14):4407.
- [13] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2011, 137(656):553-597.
- [14] ADLER R F, SAPIANO M R P, HUFFMAN G J, et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Analysis (New Version 2.3) and a Review of 2017 Global Precipitation [ J ]. Atmosfera, 2018, 9(4):138.
- [15] XIE Z, DUAN A, TIAN Q. Weighted composite analysis and its application: an example using ENSO and geopotential height[J]. Atmos Sci Lett, 2017, 18(11):435-440.
- [16] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions[J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(7):699-706.
- [17] 宫晓庆. 热带太平洋大气经圈和纬圈环流的年际及年代际变化[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [18] 王树廷,王伯民. 气象资料的整理和统计方法[M]. 北京:气象出版社,1984.
- [19] WU R, KIRTMAN B P. Regimes of seasonal air-sea interaction and implications for performance of forced simulations[J]. Climate Dyn, 2007, 29(4):393-410.
- [20] 杜美芳,徐海明,邓洁淳. 基于 CMIP5 资料的热带太平洋和印度洋海温变化与降水变化的关系及其成因分析[J]. 大气科学学报,2015,38(6):742-752.
- [21] ALEXANDER A M. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans[J]. J Climate, 2001, 15(16):2205-2231.
- [22] LAU K M, YANG S. Climatology and interannual variability of the southeast asian summer monsoon [ J ]. Adv Atmos Sci, 1997, 14(2):141-162.