

林婷婷,李春. ENSO 与南海 SST 关系的年代际变化[J].海洋气象学报,2019,39(2):68-75.

LIN Tingting, LI Chun. Interdecadal variability of the relationship between ENSO and SST over the South China Sea[J].Journal of Marine Meteorology,2019,39(2):68-75. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.007. (in Chinese)

ENSO 与南海 SST 关系的年代际变化

林婷婷^{1,2,3},李春^{1,2,3}

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,山东 青岛 266000;2. 山东省海洋-大气相互作用与气候重点实验室,山东 青岛 266000;3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室,山东 青岛 266000)

摘要: 基于 NOAA 重建的海面温度(sea surface temperature, SST)资料和 NCEP 再分析大气资料,研究了 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)与南海 SST 关系的年代际变化。结果表明:ENSO 影响南海 SST 的冬、夏季“双峰”现象发生了显著的年代际变化,即冬季的“峰值”自 20 世纪 80 年代显著减弱,而夏季的“峰值”稳定持续且在 20 世纪 70 年代之后增强;冬季“峰值”的减弱可能与冬季西北太平洋反气旋的年代际变化有关,夏季“峰值”的维持和增强可能与 20 世纪 70 年代之后印度洋 SST“电容器”效应的增强有关。

关键词: ENSO; 南海 SST; 西北太平洋反气旋; “电容器”效应

中图分类号: P732.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)02-0068-08

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.007

Interdecadal variability of the relationship between ENSO and SST over the South China Sea

LIN Tingting^{1,2,3}, LI Chun^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266100, China)

Abstract Based on the reconstructed SST (sea surface temperature) data from NOAA and atmospheric reanalysis data from NCEP, the interdecadal variability of the relationship between ENSO (El Niño-Southern Oscillation) and SCS (the South China Sea) SST is studied. It is found that the anomalous SCS SST double peak structure affected by ENSO in winter and summer has undergone significant interdecadal variability, that is, the winter peak has weakened significantly since the 1980s, while the summer peak remains stable and has been enhanced since the 1970s. The weakening of the winter peak may be related to the interdecadal variability of the western North Pacific anticyclones in winter, and the maintenance and enhancement of the summer peak may be associated with the enhancement of the capacitor effect of SST over the Indian Ocean after the 1970s.

Key words ENSO; the South China Sea SST; western North Pacific anticyclones; the capacitor effect

收稿日期:2019-02-02; 修订日期:2019-03-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0603801)

作者简介:林婷婷,女,硕士研究生,主要从事海洋-大气相互作用等研究,Lintingting_Amor@163.com。

通信作者:李春,男,博士,教授,主要从事海洋-大气相互作用、东亚季风气候及其可预测性、极端天气气候等研究,

lichun7603@ouc.edu.cn。

引言

南海位于亚洲大陆、印度洋与太平洋交合处,是南海季风的核心区和影响东亚天气气候的重要水汽通道。在南海形成的台风和来自南海的暖湿气流对中国气候有重要影响^[1-2]。南海海面温度(sea surface temperature, SST)异常对东亚季风环流系统和气候也有显著影响。中国夏季降水,在前期春季,南海、孟加拉湾和阿拉伯海 SST 为正(负)异常时,呈现长江流域偏多(偏少)、华南和华北地区偏少(偏多)的分布^[3];华南地区冬季降水在厄尔尼诺事件发生时或南海 SST 为暖异常时会增多^[4-5],因此关于南海 SST 异常变化的研究具有重要意义。

ENSO(El Niño-Southern Oscillation)事件对南海 SST 的变化有重要影响,南海 SST 异常在 ENSO 事件发生次年呈现双峰值的特征^[6-8]。当赤道东太平洋发生 ENSO 暖(冷)事件时,南海 SST 也会出现强度相当的异常偏高(低)现象^[6],在厄尔尼诺事件发生后,南海 SST 异常会出现双峰值的演变过程,两次峰值分别出现在 ENSO 事件发生次年的 2 月和 8 月,第一个峰值的出现主要与短波辐射和潜热通量异常有关,而第二个峰值主要由南海南部的平均地转热平流导致^[7],夏季风减弱、越南东部沿岸上升流减弱也会导致 SST 升高^[8]。

除 ENSO 外,印度洋对南海 SST 异常也有重要作用。厄尔尼诺事件发生在冬季,在厄尔尼诺事件衰减年夏季显著的气候异常依然存在于南海,厄尔尼诺的影响能持续到夏季是由于赤道印度洋的“电容器”效应^[9];厄尔尼诺事件达到盛期时,在遥相关的作用下,赤道印度洋会由于西南海盆的下沉 Rossby 波而增暖^[10],这是“充电”过程;赤道印度洋的 SST 异常会持续到厄尔尼诺事件衰减年的夏季,在厄尔尼诺衰退后影响西北太平洋地区的气候,这是“放电”过程。印度洋对南海产生影响主要是通过西北太平洋反气旋实现的,ENSO 导致的赤道西太平洋对流异常冷却激发的海洋 Rossby 波传到西南印度洋会导致海温增暖,在赤道两侧形成反对称风场,赤道北侧的异常东北风会持续到夏季造成北印度洋的二次增暖^[11-12],增暖激发的斜压 Kelvin 波东传到赤道西太平洋,由于边界层摩擦作用而产生 Ekman 辐散,抑制局地的对流并形成反气旋式环流,其西南侧的东风异常会反过来减弱南海夏季的

西南季风,抑制海表蒸发作用,导致海表潜热损失减少,南海海温升高^[9]。南海 SST 异常与 ENSO 和印度洋均有关,但 ENSO 与南海 SST 异常之间的关系是不稳定的,ENSO 对南海 SST 的影响在 1870—2007 年发生了明显的年代际变化,1940 年之前呈单峰值特征,1960 年之后呈双峰值特征^[13]。关于大气过程对 ENSO 期间南海 SST 年代际变化的贡献,已有研究进行了探讨^[13-14];ENSO 与南海 SST 关系发生年代际变化,一方面是由于赤道印度洋对 ENSO 的响应发生了变化,ENSO 增强,赤道印度洋的海温异常响应增大,由此导致的西北太平洋大气异常更强烈^[13];另一方面,是因为 PJ/EAP 波列增强导致更强烈的东风异常使南海 SST 异常的持续时间更长^[14]。大部分学者在研究 ENSO 对南海影响时没有考虑到印度洋和 ENSO 的相互作用。本文用偏相关等方法探究 ENSO、印度洋对南海 SST 的独立影响以及在印度洋“电容器”效应加强的背景下,ENSO 与南海 SST 异常的关系有无变化,发生的是什么样的变化以及导致这种变化的物理过程。

1 资料与方法

1.1 资料

采用的资料为:美国国家海洋与大气管理局(NOAA)的重建 ERSSTv3^[15]、v4^[16]、v5^[17]资料,时间是 1854—2017 年;美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析大气资料^[18],包括表面风场,850 hPa 风场和位势高度场,潜热通量,感热通量,长波辐射和短波辐射资料,时间是 1948—2017 年。由于 NCEP 资料时间短,为统一时间跨度,选择 1948—2017 年为研究对象。

1.2 方法

用 Niño3.4 指数表征 ENSO,用[0]表示厄尔尼诺发展年,[1]表示厄尔尼诺衰减年,南海海温取 102°~120°E,2°~20°N 的区域平均,热带印度洋海温取 40°~100°E,20°S~20°N 的区域平均。为研究 ENSO 与南海 SST 异常的关系是否存在年代际变化,首先求得海温距平并去除全球变暖的线性趋势,然后将南海 SST 异常与 Niño3.4 指数进行 21 a 滑动相关分析。其次,用偏相关分析的方法分别研究 ENSO、热带印度洋对南海的独立影响。最后,用相关分析和回归分析的方法探究可能导致 ENSO 对南海 SST 影响发生年代际变化的原因。

2 结果分析

2.1 ENSO 对南海 SST 的影响

为了研究 ENSO 与南海 SST 关系的年代际变化,给出了南海 SST 异常与 Niño3.4 指数 21 a 滑动相关(图 1a)。从图中可以看出,1948—1988 年间,ENSO 对南海地区 SST 的影响呈双峰值特征,与前人的研究结果^[7]一致,两个峰值分别出现在厄尔尼诺事件次年的 1 月和 6 月左右,第二个峰值可以一直持续到 8 月。1988 年之后,ENSO 对南海地区 SST 的影响发生了明显的年代际变化,厄尔尼诺年冬季的第一个峰值明显减弱,厄尔尼诺衰减年夏季的第二个峰值仍然存在且出现时间更晚。ENSO 对南海 SST 影响的年代际变化特征用 NOAA 的其他版本资料和 HadISST 资料也得到了同样的结果(图略)。

前人的研究表明 ENSO 对南海 SST 的影响与印

度洋有关^[9,11-12,14,19],为了研究 ENSO 对南海的独立影响,将 Niño3.4 指数与南海 SST 异常做偏相关(图 1b)。从图中可以看出,去掉热带印度洋的作用后,1988 年之前 ENSO 对南海 SST 异常影响的第二个峰值明显减弱,1988 年之后第二个峰值基本消失,这说明印度洋“电容器”效应对 ENSO 影响南海 SST 异常这一过程在 1988 年之后增强。图 2a 也可以证明这一观点,由南海 SST 异常与热带印度洋 5、6 月 SST 异常的相关系数可以看出印度洋对南海的影响在 1976/1977 年之后开始增强,在 1988 年后更加显著。这是由于 20 世纪 70 年代前,热带印度洋增暖持续不到 ENSO 事件衰减年的夏季,西北太平洋的大气异常很弱;而在 20 世纪 70 年代后,热带西南印度洋温跃层变浅,ENSO 引起的印度洋增暖在 1976/1977 年之后明显增强^[20],印度洋增暖持续的时间更长,由此导致的西北太平洋的大气异常也更加显著^[14],从而导致更强的“电容器”效应。

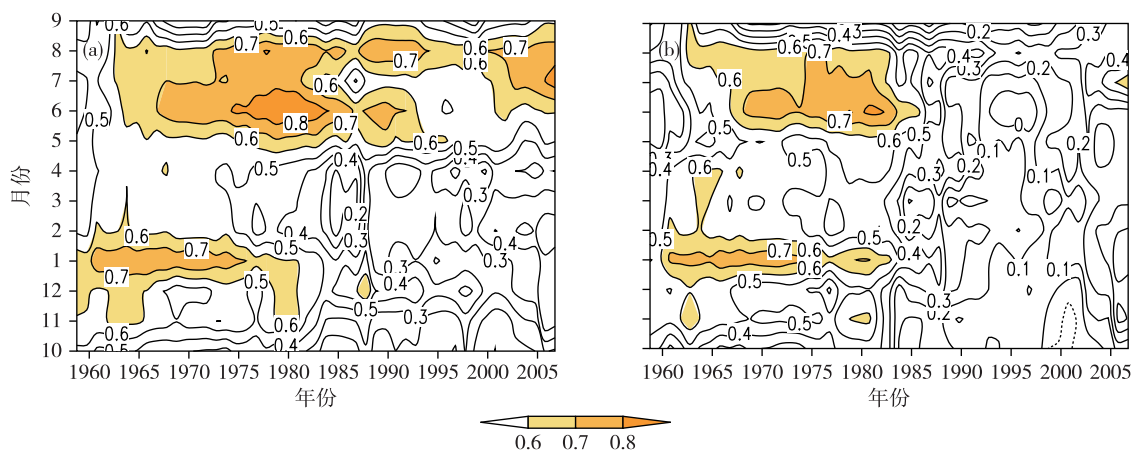


图 1 NDJ(0/1) Niño3.4 指数与南海 SSTA 的 21 a 滑动相关(a)和去除热带印度洋 SSTA 影响的偏相关(b)

Fig.1 The 21 a running correlation (a) between NDJ(0/1) Niño3.4 index and SCS (the South China Sea) SSTA; (b) is the same as (a), but for partial correlation removing the influence of SSTA in the tropical Indian Ocean

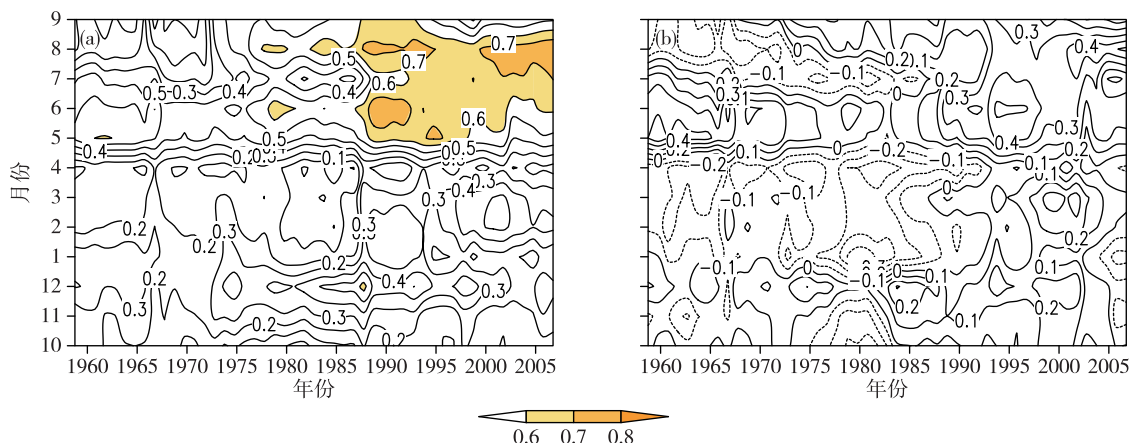


图 2 热带印度洋 5、6 月 SSTA 与南海 SSTA 的 21 a 滑动相关(a)和去除 ENSO 影响的偏相关(b)

Fig.2 The 21 a running correlation (a) between SSTA in May and June in the tropical Indian Ocean and SCS SSTA; (b) is the same as (a), but for partial correlation removing the influence of ENSO

热带印度洋对南海 SST 的影响是 ENSO 间接作用的结果, ENSO 通过遥相关作用在西南赤道印度洋的温跃层脊处造成持续的 SST 异常增暖现象, 增暖导致赤道两侧形成反对称风场, 赤道北侧的东北风异常会引起北印度洋的“二次增暖”。北印度洋增暖激发的斜压 Kelvin 波传到赤道西太平洋形成异常的反气旋式环流, 反气旋环流西南侧的偏东风会反过来减弱南海的西南季风, 引起南海夏季的 SST 异常^[9]。图 2b 是南海 SST 异常与印度洋 5、6 月 SST 异常的偏相关, 从图中可以看出去掉 ENSO 的影响之后热带印度洋的作用变得不显著, 这说明热带印度洋对南海的影响确实是通过 ENSO 作用间接实现的。

2.2 ENSO 与南海 SST 关系发生年代际变化的可能原因

ENSO 对赤道太平洋以外海域的影响是通过沃克环流形成的“大气桥”实现的^[21], 在 ENSO 暖阶段, 赤道西太平洋的对流活动会东移导致沃克环流改变, 在赤道中部和东部太平洋出现异常上升气流, 赤道大西洋和赤道印度洋—西太平洋地区出现异常下沉气流, 因此哈得来环流在东太平洋加强而在大西洋和印度—西太平洋地区减弱。异常的沃克环流和哈得来环流会引起海面风场的变化, 从而

导致 SST 异常。根据图 1a 中 ENSO 对南海影响年代际变化的特征, 将 1948—2017 年分为两个时期: 1948—1988 年和 1989—2017 年, 分别探究在不同年代际背景下, ENSO 对南海 SST 异常产生影响的物理过程。

图 3 是 Niño3.4 指数与南海 SST 异常、表面风异常的相关系数, 与图 1a 的相关系数分布基本一致。在厄尔尼诺年冬季, 1948—1988 年南海 SST 显著增暖, 但 1989—2017 年南海 SST 增暖很弱。两个时期的风场存在显著差异, 1948—1988 年南海南部出现的是东南风异常, 南海北部出现的是西南风异常, 异常偏南风与南海冬季盛行的东北季风方向相反, 利于增暖; 1989—2017 年的厄尔尼诺年冬季, 南海北部出现的也是异常南风, 南海南部风场变化明显, 异常风为东风, 不利于增暖。厄尔尼诺事件衰减年的夏季, 两个时期南海 SST 都存在显著增暖, 1948—1988 年增暖从晚春初夏开始出现, 1989—2017 年的增暖比前一个时期晚, 持续时间更长。从风场来看, 两个时期的异常风都是东北风, 与盛行季风风向相反, 利于增暖, 1989—2017 年 6—7 月的东北风异常更强, 这可能是导致增暖持续时间更长的原因。

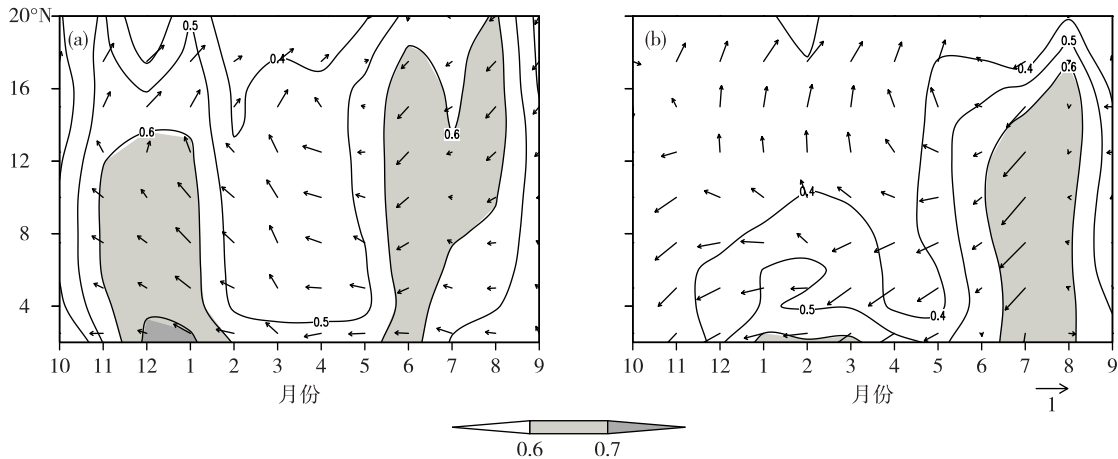


图 3 102°~120°E 纬向平均海面温度和海面风与 NDJ(0/1) Niño3.4 指数的时滞相关(a.1948—1988 年, b.1989—2017 年)
Fig.3 Lagged correlation between zonal mean SST and NDJ(0/1) Niño3.4 index as well as that between surface wind and NDJ(0/1) Niño3.4 index between 102°E and 120°E (a. from 1948 to 1988, b. from 1989 to 2017)

ENSO 事件衰减年的夏季, 南海的海温异常与印度洋的“电容器”效应关系密切^[9], 20 世纪 70 年代以后印度洋的增暖持续时间更长, 在西北太平洋形成的反气旋式环流会更强, 对周围地区的影响也更加明显^[22]。图 4 是 Niño3.4 指数与冬、夏季节 850 hPa 风场和位势高度场的回归系数图, 从环流

场来看, 厄尔尼诺事件衰减年夏季西北太平洋存在明显的反气旋式环流(图 4a、b), 与前一时期相比, 1989—2017 年西北太平洋反气旋更强, 反气旋式环流西南侧的偏东风异常也更明显, 异常东风会减弱南海夏季盛行的西南季风, 导致南海 SST 异常增暖。

不同类型的 ENSO 产生的气候影响也存在差

异^[23],在1988/1989年冬季 ENSO 类型发生了年代际变化,在1988/1989年后,西太平洋温度变化大,东太平洋温度变化小,CP型 ENSO 显著^[24],CP型 ENSO 事件发生时菲律宾海反气旋位置与 EP 型 ENSO 相比位置更加偏西^[25]。由图4b来看,厄尔尼诺年的冬季,两个时期西北太平洋反气旋的强度和

位置存在显著差异:1989—2017年冬季菲律宾海反气旋的强度更强,反气旋中心也更加偏西,南海地区的南风异常偏弱,对冬季东北季风的抵消作用相对小,不利于南海增暖,这可能是1989—2017年厄尔尼诺年冬季南海异常峰值减弱的原因。

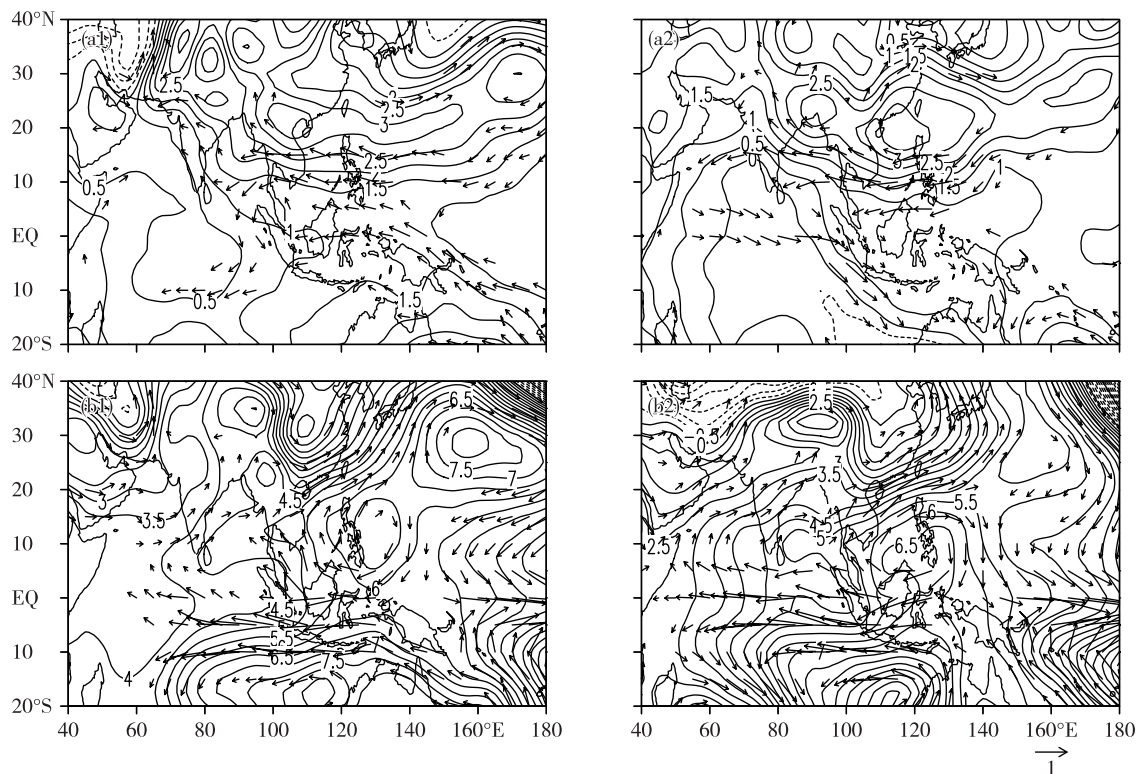


图4 NDJ(0/1) Niño3.4 指数与夏(a;6-8月)、冬(b;2月-次年2月)季850 hPa 风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和位势高度场(等值线,单位:gpm)的回归(a1/b1.1948—1988年,a2/b2.1989—2017年)

Fig.4 Regression map of wind field at 850 hPa (arrow, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a. summer, JJA; b. winter, DJF) and geopotential height field (isoline, units: gpm) upon NDJ(0/1) Niño3.4 index (a1/b1. from 1948 to 1988, a2/b2. from 1989 to 2017)

在厄尔尼诺发生时期,大气和海洋会发生异常变化。厄尔尼诺发生时,赤道东太平洋 SST 异常升高,赤道东风风力减弱甚至转为西风,沃克环流上升支东移,南海地区出现异常的下沉气流;西太平洋副热带高压的位置更加偏南、偏西,副热带高压南部的东风气流会在其西侧转为西南向的气流,导致南海夏季风增强^[26]。图5a中等值线表示1948—1988年南海 SST 异常与 Niño3.4 指数的相关性,1月相关性达到峰值,呈现从西南向东北递减的特征,1月之后相关性开始减弱,随着厄尔尼诺的消亡,南海 SST 异常达到第一个峰值的过程结束。4月相关系数逐渐增大,在7月左右再次达到最大值。将两个时期的 SST 异常与 Niño3.4 指数的相关系数进行比较可以看出,1989—2017年的相关系数普遍比1948—1988年低。从风场来看,1989—2017

年,1月南海南部的异常南风有减弱趋势,在东南部海域甚至转为与气候态风场一致的东北风,这会导致1月东北季风风力增大,海表蒸发作用加强,潜热通量损失增加(图6a),带走更多的海表热量,导致南海 SST 异常1月峰值减弱。

ENSO 影响造成的风场异常不仅会影响南海地区的热力过程,还会导致异常的动力过程——Ekman 抽吸。图5中填色部分显示的是 Niño3.4 指数与海面风场的回归系数以及由此计算得到的垂直涡度,南海地区受 ENSO 的影响会在北半球的冬春季节造成南风异常,在夏季造成东风异常(图3),异常风会导致异常的 Ekman 抽吸,从而引起上升和下沉运动,异常的下沉运动会抑制低层冷水的上翻,利于 SST 升高。将图5的垂直涡度进行对比可以看出:与1948—1988年相比,1989—2017年1月

只有南海的南部和北部存在弱的上升运动,大部分海域发生的是下沉运动,不利于 SST 冷却,因而

Ekman 抽吸作用对 1 月峰值减弱的贡献很小。

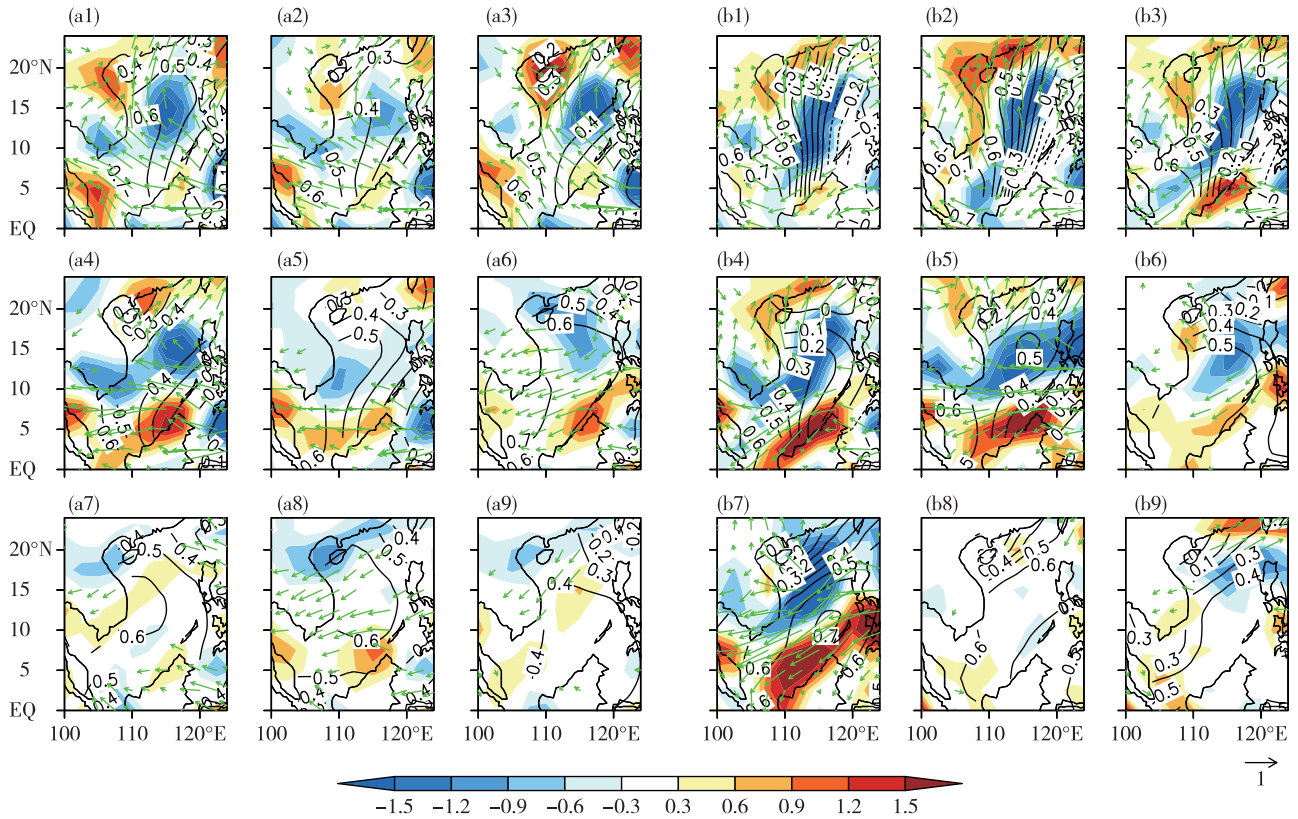


图 5 NDJ(0/1) Niño3.4 指数与南海 SSTA 的相关性(等值线)、与表面风场的回归(箭头,单位: $m \cdot s^{-1}$)以及由回归风场计算得到的垂直涡度(填色,单位: $10^{-6} s^{-1}$) (a1-a9. 1948—1988 年 1—9 月, b1-b9. 1989—2017 年 1—9 月)

Fig.5 Correlation (isoline) between NDJ(0/1) Niño3.4 index and SCS SSTA, regression coefficient of surface wind field (arrow, units: $m \cdot s^{-1}$) upon NDJ(0/1) Niño3.4 index, and vertical vorticity (colored, units: $10^{-6} s^{-1}$) calculated by the regression coefficient (a1/b1-a9/b9. from January to September from 1948/1989 to 1988/2017)

南海和赤道东太平洋 SST 异常之间的关联是通过 ENSO 驱动的大气遥相关改变表面热通量和风场来实现的,这一部分从热通量的角度讨论可能导致 1 月峰值减弱的原因。将图 6 中两个时期的热通量进行比较可以看出:1989—2017 年,潜热通量在南海 15°N 以北有增暖作用,15°N 以南有冷却作用,冷却作用比 1948—1988 年更强;1989—2017 年,短波辐射对南海增温作用更明显,南海地区云量减少导致短波辐射增加,不利于 1 月峰值消失;长波辐射和感热通量都有利于 1 月峰值的减弱,但由于二者的量级较小,对南海 SST 异常的贡献较其他两项也相对小。

3 结论

通过分析 NOAA 的重建 SST 资料和 NCEP 的再分析大气资料,探究了 ENSO 对南海 SST 影响的年代际演变特征和导致二者关系发生年代际变化的

物理机制。采用相关分析、偏相关分析和回归分析的方法,初步得到了以下结论。

1) ENSO 对南海地区 SST 异常的影响在 1988 年发生了明显的年代际变化,20 世纪 80 年代之前, ENSO 对南海地区 SST 异常的影响呈双峰值特征,两个峰值分别出现在厄尔尼诺年的 1 月和厄尔尼诺年次年的 6 月左右;20 世纪 80 年代之后,厄尔尼诺年冬季的第一个峰值明显减弱,第二个峰值出现时间推后。

2) 印度洋对南海的影响是 ENSO 的间接作用,印度洋“电容器”效应对 ENSO 影响南海 SST 异常这一过程在 20 世纪 70 年代之后开始增强,20 世纪 80 年代后更加显著,这可能是印度洋“电容器”效应在 20 世纪 70 年代后增强导致的:印度洋的电容器效应在 1976/1977 年发生了稳态转换,1976/1977 年后印度洋增暖持续时间更长, ENSO 发生的次年夏季在西北太平洋形成的反气旋式环流更强,由此

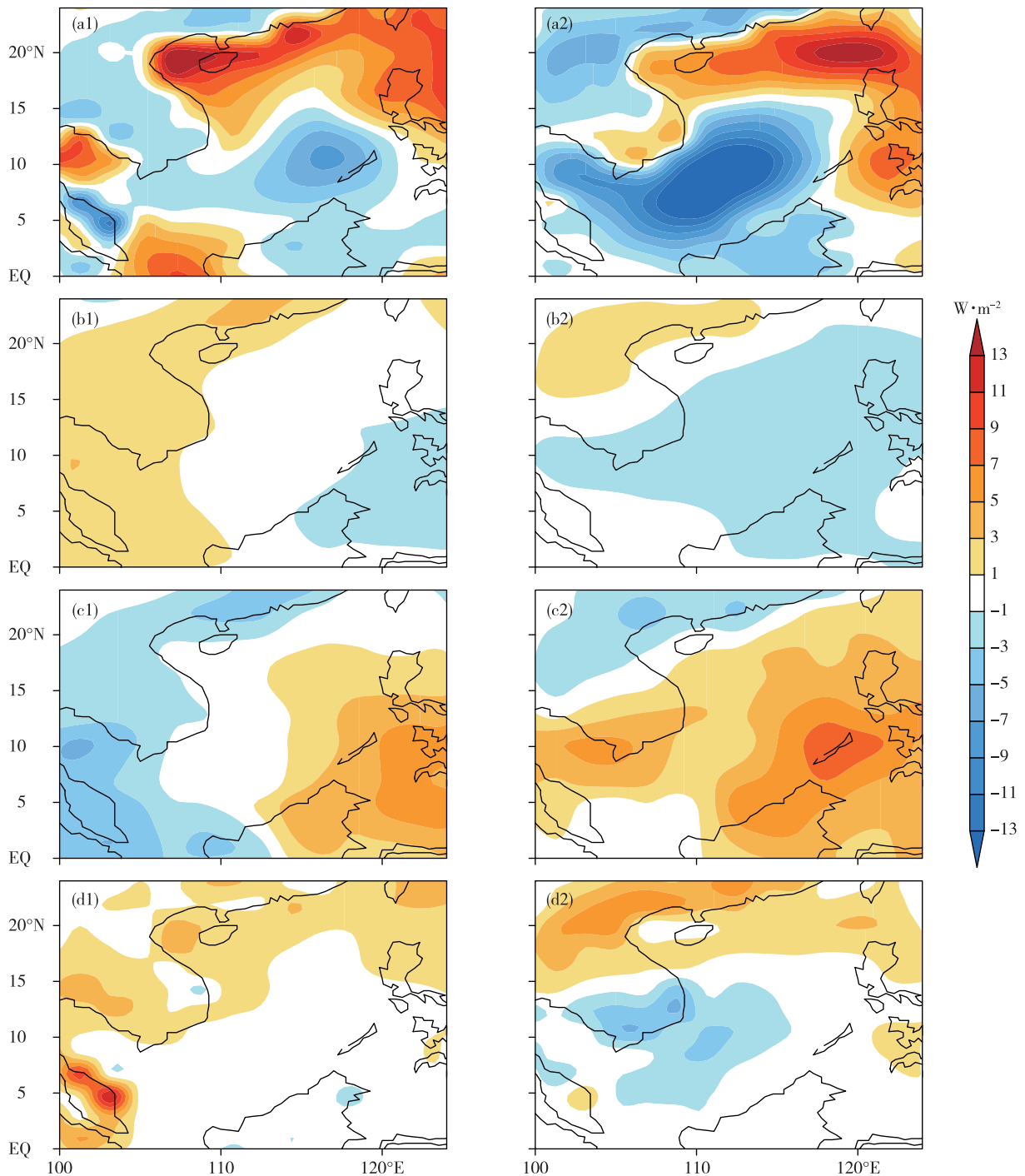


图6 1月南海海面热通量与NDJ(0/1) Niño 3.4指数的回归(a.潜热通量,b.长波辐射,c.短波辐射,d.感热通量;单位: $W \cdot m^{-2}$;左:1948—1988年,右:1989—2017年)

Fig.6 Regression coefficient of SCS surface heat flux in January upon NDJ(0/1) Niño 3.4 index (a. latent heat flux, b. long-wave radiation, c. short-wave radiation, d. sensible heat flux; units: $W \cdot m^{-2}$; left: from 1948 to 1988, right: from 1989 to 2017)

导致的海气相互作用也更强。

3)厄尔尼诺年冬季 ENSO 对南海地区 SST 异常的第一个峰值减弱可能是因为 1988/1989 年后 ENSO 类型发生了年代际变化,1989 年后 CP 型 ENSO 更加显著,冬季菲律宾海反气旋的强度更强、

反气旋中心更加偏西,异常风导致冬季南海地区风增强,潜热损失增加,从而抑制了南海 SST 的异常增暖。

参考文献:

- [1] 王靖,钱传海,张玲.2017年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2018,38(2):1-11.
- [2] 张福颖,潘爱军,范伶俐.中国南方冬雨与 El Niño 事件相关关系的年代际差异及其成因[J].海洋气象学报,2018,38(4):38-44.
- [3] 闵锦忠,孙照渤,曾刚.南海和印度洋海温异常对东亚大气环流及降水的影响[J].南京气象学院学报,2000,23(4):542-548.
- [4] ZHOU L T, TAM C Y, ZHOU W, et al. Influence of South China Sea and the ENSO on winter rainfall over South China[J]. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(4): 832-844.
- [5] ZHOU L T, WU R G. Respective impacts of the East Asian winter monsoon and ENSO on winter rainfall in China [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2010, 115 (D2): D02017.
- [6] 钮智旺.南海表层水温的长周期振荡及其与厄尔尼诺的关系[J].海洋学报,1994,16(2):43-49.
- [7] WANG C Z, WANG W Q, WANG D X, et al. Interannual variability of the South China Sea associated with El Niño [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 2006, 111 (C3): C03023.
- [8] 黄卓,徐海明,杜岩,等.厄尔尼诺期间和后期南海海面温度的两次显著增暖过程[J].热带海洋学报,2009,28(5):49-55.
- [9] XIE S P, HU K M, HAFNER J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J Climate*, 2009, 22(3): 730-747.
- [10] 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.
- [11] DU Y, XIE S P, HUANG G, et al. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced north Indian Ocean warming[J]. *J Climate*, 2009, 22(8): 2023-2038.
- [12] DU Y, XIE S P, YANG Y L, et al. Indian Ocean variability in the CMIP5 multimodel ensemble: The Basin Mode[J]. *J Climate*, 2013, 26(18): 7240-7266.
- [13] XIE S P, DU Y, HUANG G, et al. Decadal shift in El Niño influences on Indo-Western Pacific and East Asian climate in the 1970s [J]. *J Climate*, 2010, 23 (12): 3352-3368.
- [14] YANG Y L, XIE S P, DU Y, et al. Interdecadal difference of interannual variability characteristics of South China Sea SSTs associated with ENSO [J]. *J Climate*, 2015, 28(18): 7145-7160.
- [15] SMITH T M, REYNOLDS R W, PETERSON T C, et al. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880—2006) [J]. *J Climate*, 2008, 21(10): 2283-2296.
- [16] HUANG B Y, BANZON V F, FREEMAN E, et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and intercomparisons [J]. *J Climate*, 2014, 28(3): 911-930.
- [17] HUANG B Y, THORNE P W, BANZON V F, et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *J Climate*, 2017, 30 (20): 8179-8205.
- [18] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(3): 437-471.
- [19] WU R G, KIRTMAN B P, KRISHNAMURTHY V. An asymmetric mode of tropical Indian Ocean rainfall variability in boreal spring [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2008, 113(D5): D05104.
- [20] CHOWDARY J S, XIE S P, TOKINAGA H, et al. Interdecadal variations in ENSO teleconnection to the Indo-Western Pacific for 1870-2007 [J]. *J Climate*, 2012, 25(5): 1722-1744.
- [21] 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.
- [22] HUANG G, HU K M, Xie S P. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the northwest Pacific since the mid-1970s: An atmosphere GCM study [J]. *J Climate*, 2010, 23(19): 5294-5304.
- [23] FENG J, WANG L, CHEN W, et al. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2010, 115(D24): D24122.
- [24] JEONG H I, AHN J B, LEE J Y, et al. Interdecadal change of interannual variability and predictability of two types of ENSO [J]. *Climate Dyn*, 2015, 44 (3/4): 1073-1091.
- [25] YU S, SUN J Q. Revisiting the relationship between El Niño-Southern Oscillation and the East Asian winter monsoon [J]. *Int J Climatol*, 2018, 38(13): 4846-4859.
- [26] 梁建茵,林爱兰,李春晖.南海及周边地区 TBB 季节内振荡及其与 ENSO 的联系 [J]. *气象学报*, 2005, 63(3): 267-277.