

# 夏季赤道中东太平洋海温异常对南海低空越赤道气流的影响

范倩莹<sup>1\*</sup>, 牛亚萍<sup>1#</sup>, 唐登洪<sup>2</sup>, 沙桐<sup>3</sup>, 岳元<sup>4</sup>

<sup>1</sup>陕西省气象台, 陕西 西安

<sup>2</sup>空军航空大学, 吉林 长春

<sup>3</sup>陕西科技大学, 陕西 西安

<sup>4</sup>吉林省气象台, 吉林 长春

收稿日期: 2022年4月20日; 录用日期: 2022年5月20日; 发布日期: 2022年5月27日

## 摘要

利用1979~2020年NCEP/NCAR逐月的风场、海平面气压场以及HadISST逐月海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)等再分析资料, 采用相关分析及合成分析等方法探讨了夏季赤道中东太平洋海表面温度异常(Sea Surface Temperature Anomalies, SSTA)对南海(South China Sea, SCS)低空越赤道气流(Cross-Equatorial Flow, CEF)变化的可能影响, 结果表明: 夏季SCS CEF (SCEF)强度变化与同期赤道中东太平洋SSTA呈显著的正相关关系。当夏季赤道中东太平洋SSTA增暖时, Walker环流异常减弱, 赤道西太平洋出现异常下沉运动, 位于赤道西太平洋的海洋性大陆和澳大利亚北部海平面气压异常上升; 与此同时, 东亚Hadley环流异常减弱, 使得西北太平洋海平面气压异常降低, 有利于产生南北向的气压梯度, 从而引导SCEF增强; 反之亦然。

## 关键词

气候学, 合成分析, 夏季, 南海越赤道气流, 海温异常

# The Influence of Sea Surface Temperature Anomalies in the Middle Eastern Equatorial Pacific on the Low-Level Cross-Equatorial Flow over the South China Sea in Summer

Qianying Fan<sup>1\*</sup>, Yaping Niu<sup>1#</sup>, Denghong Tang<sup>2</sup>, Tong Sha<sup>3</sup>, Yuan Yue<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an Shaanxi

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 范倩莹, 牛亚萍, 唐登洪, 沙桐, 岳元. 夏季赤道中东太平洋海温异常对南海低空越赤道气流的影响[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(3): 352-361. DOI: 10.12677/ccr.2022.113035

<sup>2</sup>Aviation University of Air Force, Changchun Jilin<sup>3</sup>Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an Shaanxi<sup>4</sup>Jilin Meteorological Observatory, Changchun JilinReceived: Apr. 20<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2022; published: May 27<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The monthly mean NCEP/NCAR reanalysis data of wind field, sea-level pressure field, and Sea Surface Temperature (SST) data of HadISST are used in 1979~2020 to explore the relationship of the Low-level Cross-Equatorial Flow (CEF) over the South China Sea (SCS) and eastern equatorial Pacific Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA). The results showed that the SSTA in the eastern and central tropical Pacific has important influence on the change of the SCS low-level CEF (SCEF) in the summer, and there is a significantly positive correlation between them. When the SSTA of the eastern and central tropical Pacific gets warmer in the summer, the Walker circulation anomaly weakens, and anomalous subsidence occurs in the western tropical Pacific. Sea level pressure in the western tropical Pacific and northern Australia rise abnormally. At the same time, the East Asian Hadley circulation anomaly weakens, the anomalous sea-level pressure gets lower in the northwest Pacific, which is conducive to generating a north-south pressure gradient and then guides SCEF enhancement, and vice versa.

## Keywords

Climatology, Composite Analysis, Summer, Cross-Equatorial Flow over the South China Sea, Sea Surface Temperature Anomaly

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

## 1. 引言

越赤道气流(Cross Equatorial Flow, CEF)作为南北半球质量、动量交换的途径,是影响南、北半球天气发生及气候异常的重要因子,与亚洲夏季降水、季风以及热带气旋等重要天气联系密切[1] [2] [3] [4] [5]。南海(South China Sea, SCS) CEF (简称 SCEF)作为亚洲夏季风环流系统的重要组成部分,其变化对于亚洲地区的水汽输送和环流异常具有显著的影响[6] [7] [8] [9] [10]。

众所周知,海温是影响短期气候预测重要的外强迫因子,是影响气候形成及变化的重要因素。研究表明大尺度海气耦合相互作用对区域降水及气温异常有显著影响[11] [12] [13] [14]。近年来,许多学者开始关注 CEF 与海温的关系,发现海温异常与索马里 CEF 变化关系较为密切,主要表现为夏季索马里 CEF 强度的年际变化与 ENSO 循环密切相关,即索马里 CEF 较弱时对应着 El Nino;反之则对应 La Nina [15] [16] [17]。此外,有研究指出,夏季索马里 CEF 不仅与 ENSO 循环密切相关,还与海洋性大陆区、印度洋及澳洲东部区等海域的海温异常存在显著相关[18] [19] [20] [21]。研究表明,当夏季索马里 CEF 偏强(偏弱)而澳大利亚 CEF 偏弱(偏强)时,有利于随后秋冬季节中负(正)位相的 ENSO 和 IOD 形成[22] [23]。施宁等[24]发现,当前冬赤道东太平洋海温偏高、黑潮区和西风漂流区海温偏低,出现 El Nino 事件特征时,

次年5、6月份索马里 CEF 偏弱；反之亦然。刘秦玉等[25]的研究发现，110°E 附近南海和东印度洋海温的季节变化有利于 SCEF 的形成和维持。彭维耿和蒋尚城的研究[26]指出，SCEF 冬夏季均受到 TBO (2~3 年周期)的影响。此外，东亚 CEF 的变化与赤道中东太平洋海温呈显著正相关，而与印尼地区海温及澳大利亚以东的太平洋海温呈显著负相关[17]。

综上所述，以往的研究主要关注夏季索马里 CEF 的变化与同期赤道中东太平洋海温的关系，而有关夏季赤道中东太平洋海温对 SCEF 强度变化的影响及其可能途径的研究还相对较少，因此，本文尝试对此进行一些探讨。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料

美国 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)提供的逐月再分析资料[27]，包括经纬向风场、垂直速度场、海平面气压场(Sea Level Pressure, SLP)以及向外长波辐射 OLR (Outgoing Longwave Radiation)场资料，水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，资料时间长度为 1979 年 1 月~2020 年 12 月。

英国 HadISST (Hadley Center Global Sea Ice and Sea Surface Temperature)的逐月 SST 资料[28]，水平分辨率为  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ ，资料时段为 1979 年 1 月~2020 年 12 月。

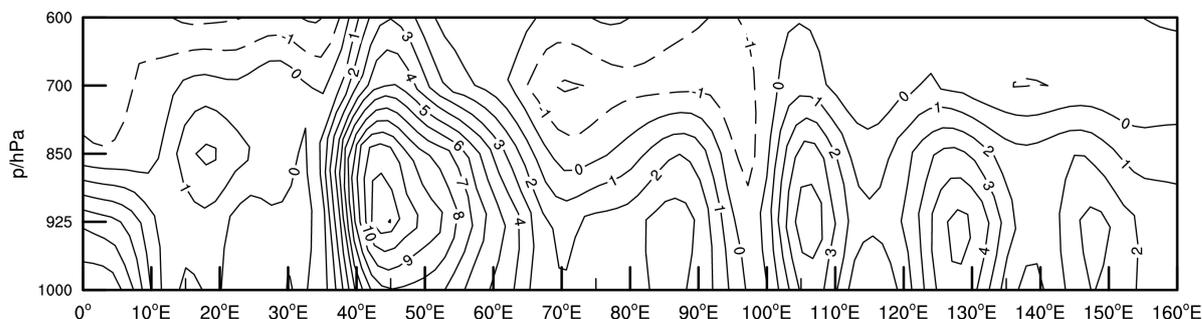
美国伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI)提供的全球海洋的海-气通量客观分析(OAFlux)月平均海-气湍流热通量资料(感热通量和潜热通量) [29]，水平分辨率为  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ ，向上为正，资料时段为 1979 年 1 月~2019 年 6 月。

### 2.2. 方法

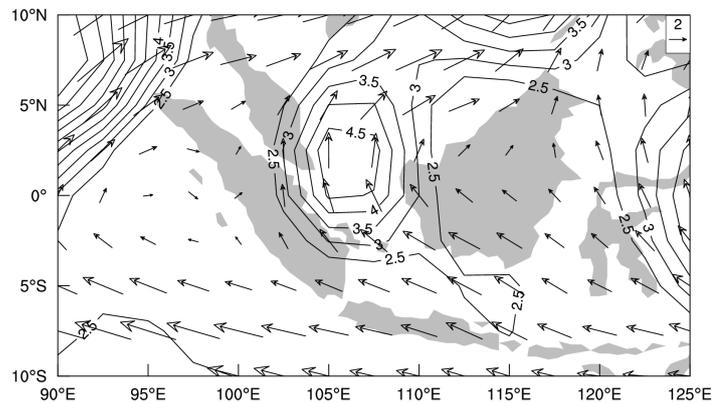
本文主要采用相关分析及合成分析等统计分析方法。

## 3. 夏季南海越赤道气流强度指数的定义

图 1 与图 2 分别为 1979~2020 年气候平均的夏季沿赤道经向风高度-经度剖面 and 925hPa 水平风场。由图 1 可见，夏季 SCEF 强度的最大值在 925 hPa 等压面上，其核心大值区位于  $(2.5^\circ\text{S}\sim 5^\circ\text{N}, 102.5^\circ\sim 110^\circ\text{E})$  区域(图 2)，因此，本文将此区域内各点经向风的平均值定义为夏季 SCEF 强度指数(ISCEF)。为表征夏季 SCEF 的年际异常，将 SCEF 强度指数的标准化数值大于 1 的年份定义为夏季 SCEF 强年(1979, 1982, 1987, 1994, 1997, 2018, 2019 年，共 7 a)，标准化数值小于 -1 的年份定义为夏季 SCEF 弱年(1996, 1998, 2007, 2010, 2013, 2016 年，共 6 a)。



**Figure 1.** Averaged meridional wind speed along the equatorial vertical profile in summer during 1979~2020 (units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
**图 1.** 1979~2020 年气候平均的夏季经向风速沿赤道垂直剖面(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )



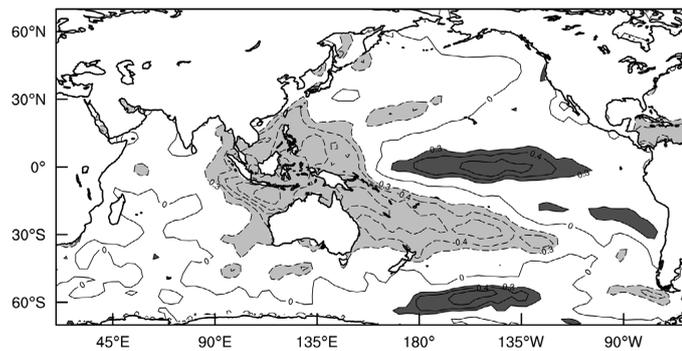
阴影表示陆地，实线为经向风速  $\geq 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的等值线。

**Figure 2.** Averaged horizontal wind field at 925 hPa in summer during 1979~2020 (units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

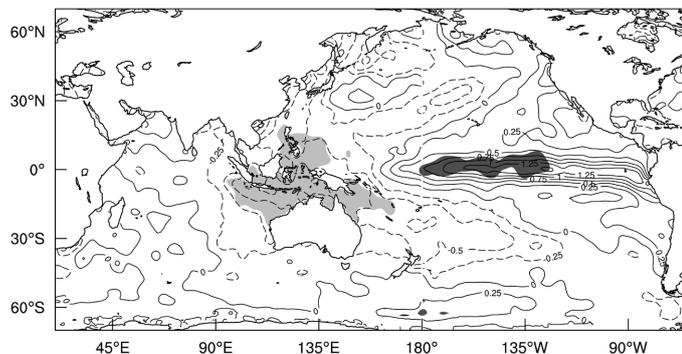
**图 2.** 1979~2020 年气候平均的夏季 925 hPa 水平风场(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

#### 4. 夏季南海越赤道气流变化与全球海温的联系

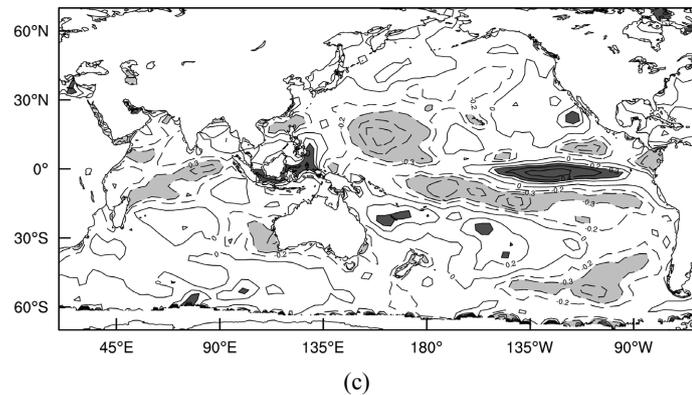
图 3(a)为 1979~2020 年夏季 SCEF 强度指数与同期全球海表面温度异常(Sea Surface Temperature anomalies, SSTa)的相关系数分布。由图 3(a)可以看出, 夏季海洋性大陆区、赤道东南印度洋及澳洲东部海域的 SSTa 与 SCEF 年际变化呈显著负相关关系, 而赤道中东太平洋区域 SSTa 与 SCEF 年际变化存在显著的正相关关系, 中心数值达 0.4 以上(通过 95% 的信度检验)。由此可见, 夏季 SCEF 年际变化与同期赤道中东太平洋 SSTa 有密切的关系, 当 SCEF 强度增强时, 赤道中东太平洋 SSTa 为暖异常; 反之亦然。



(a)



(b)



阴影区为通过了 95%的信度检验区。

**Figure 3.** Distribution of correlation coefficients between the intensity index of SCEF and the global SSTA in summer during 1979~2020 (a), the composite differences of the global SSTA corresponding to the strong and weak years of SCEF in summer during 1979~2020 (b), units:  $^{\circ}\text{C}$ , and distribution of correlation coefficients between the intensity index of SCEF and the global turbulent heat flux anomalies in summer during 1979~2018 (c)

**图 3.** 1979~2020 年夏季 SCEF 强度指数与同期全球 SSTA 的相关系数分布(a)、同期 SCEF 强、弱年对应的全球 SSTA 合成差值(b), 单位:  $^{\circ}\text{C}$  及 1979~2018 年夏季 SCEF 强度指数与同期全球海表湍流热通量异常的相关系数分布(c)

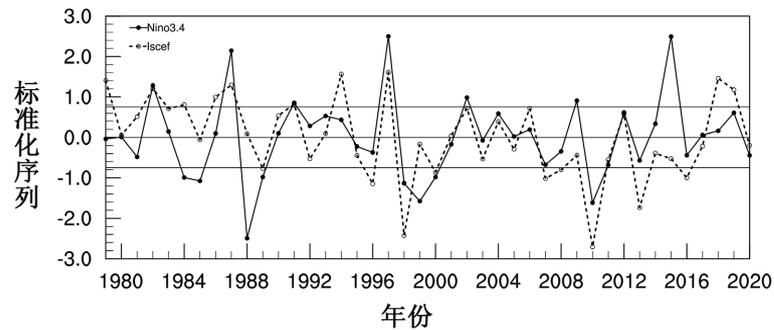
为了验证夏季 SCEF 强度变化与同期全球 SSTA 的关系, 图 3(b)给出了 1979~2020 年夏季 SCEF 强度指数与夏季 SCEF 强、弱年对应的全球 SSTA 合成差值。由图 3(b)可以看出, 海温显著正距平区域位于赤道中东太平洋, 而赤道西太平洋、赤道东南印度洋及澳洲东部海域为负距平。合成分析的结果与图 3(a)较为一致, 表明当 SCEF 强度增强时, 赤道中东太平洋 SSTA 升高, 而赤道西太平洋、赤道东南印度洋及澳洲东部海域的 SSTA 降低; 反之亦然。

海表面湍流热通量(潜热通量和感热通量)异常与 SST 的变化是紧密相连的, 这种联系随季节和地区的变化而不同[30]。因此, 图 3(c)给出了 1979~2018 年夏季 SCEF 强度指数(ISCEF)与同期全球海表湍流热通量异常的相关系数分布, 由图 3(c)可见, 夏季 SCEF 年际变化与同期海洋性大陆区部分海域、澳洲东部区海域及赤道中东太平洋海表湍流热通量异常呈显著正相关。对比图 3(a)与图 3(c), 赤道中东太平洋 SSTA 和海表湍流热通量异常与 ISCEF 均存在较好的正相关, 相关系数中心值均达到 0.4 以上(通过 95%的信度检验), 说明夏季赤道中东太平洋 SSTA 和海表湍流热通量异常对 SCEF 变化有重要影响; 而 ISCEF 与赤道西太平洋及海洋性大陆区海域 SSTA(海表湍流热通量异常)呈明显的负(正)相关关系, 说明夏季赤道西太平洋及海洋性大陆区 SSTA 主要受大气影响, 不是影响 SCEF 的主要因子, 这与以往研究结果[31]有所不同。

## 5. 夏季赤道中东太平洋海温异常的可能影响途径

为了进一步说明夏季赤道中东太平洋 SSTA 对 SCEF 变化的影响, 本文利用海表温度异常 SSTA 在 Nino3.4 区( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$ )的区域平均作为海温关键区指数, 图 4 为 1979~2020 年夏季 Nino3.4 和南海越赤道气流强度指数(ISCEF)的标准化曲线。统计表明, 二者的相关系数达 0.51, 通过 0.01 的显著性水平检验, 说明夏季赤道中东太平洋 SSTA 与 SCEF 变化的关系较为密切, 当赤道中东太平洋 SSTA 偏暖时, SCEF 强度增强; 反之亦然。

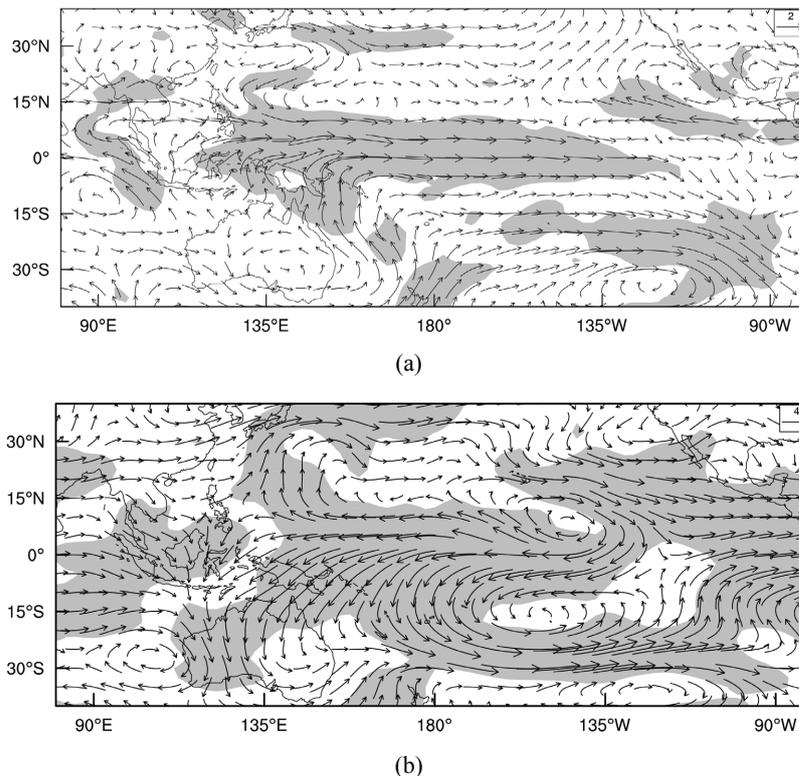
此外, 由图 4 可以看出夏季 Nino3.4 存在明显的年际变化特征, 其异常指数最大值出现在 1997 年, 最小值出现在 1988 年。为表征夏季 Nino3.4 的年际异常, 将 Nino3.4 的标准化数值大于 0.75 的年份定义为夏季 Nino3.4 暖位相年(1982, 1987, 1991, 1997, 2002, 2009, 2015 年, 共 7 a), 标准化数值小于 -0.75 的年份定义为夏季 Nino3.4 冷位相年(1984, 1985, 1988, 1989, 1998, 1999, 2000, 2010 年, 共 8 a)。



**Figure 4.** Normalized time series of intensity index of Nino3.4 and cross-equatorial flow over the South China Sea (ISCEF) in summer during 1979–2020

**图 4.** 1979~2020 年标准化的夏季 Nino3.4 和南海越赤道气流强度指数(ISCEF)

图 5 给出了夏季 Nino3.4 暖、冷位相年对应的 850 hPa 风场及 200 hPa 风场距平合成差值。由图可见，当夏季赤道中东太平洋 SSTA 增暖时，在低层 850 hPa 风场上，西北太平洋出现异常反气旋式环流，孟加拉湾至赤道西太平洋地区为显著西风异常，赤道东印度洋及南海北部为气旋式风场异常，使得中国华南地区出现东北风异常，此种风场配置有利于 SCEF、南海夏季风的增强及东亚副热带夏季风的减弱。此外，赤道中东太平洋为异常西风气流，热带印度洋及大西洋为异常东风气流，这种风场配置有利于赤道中东太平洋产生低空辐合运动，在赤道西太平洋出现低空辐散运动，表现为 Walker 环流减弱。在高层 200 hPa 风场上，赤道中东太平洋出现气流辐散，热带印度洋及大西洋为异常西风气流，这种风场异常分布说明，



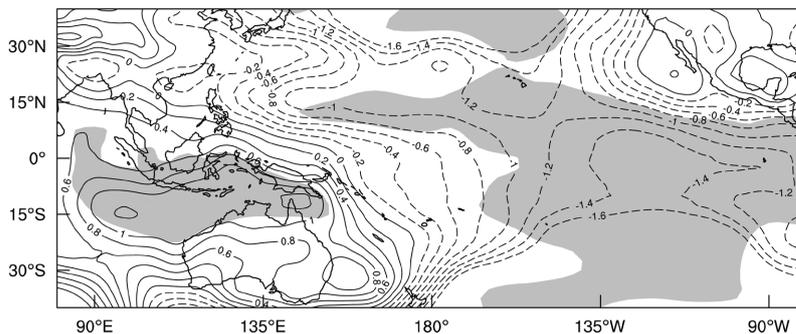
阴影区为通过了 95%的信度检验区。

**Figure 5.** Composite differences of the wind field anomalies at 850 hPa (a) and 200 hPa (b) corresponding to the strong and weak years of Nino3.4 in summer (units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 5.** 夏季 Nino3.4 暖、冷位相年对应的 850 hPa 风场(a)及 200 hPa 风场(b)距平合成差值(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

赤道中东太平洋 SSTA 增暖时, 对流层高层在赤道西太平洋 120°E 附近存在风场的异常辐合, 同时在赤道东太平洋 110°W 附近有风场的辐散运动; 反之亦然。对比来看(图 5(a)、图 5(b)), 夏季赤道中东太平洋 SSTA 上升(下降)时, 同期 Walker 环流明显减弱(增强)。

图 6 为夏季 Nino3.4 暖、冷位相年对应的 SLP 场距平合成差值, 可以看出, 当夏季赤道中东太平洋 SSTA 偏暖时, 赤道中东太平洋 SLP 异常降低, 亚洲大陆热低压增强, 位于热带西太平洋的赤道辐合带显著增强, 赤道中东印度洋至澳大利亚北部地区 SLP 显著上升, 对应印度洋高压及澳大利亚高压增强, 南北半球间气压梯度力增加, 有利于赤道附近地区西南气流的形成, 故 SCEF 易增强; 反之亦然。

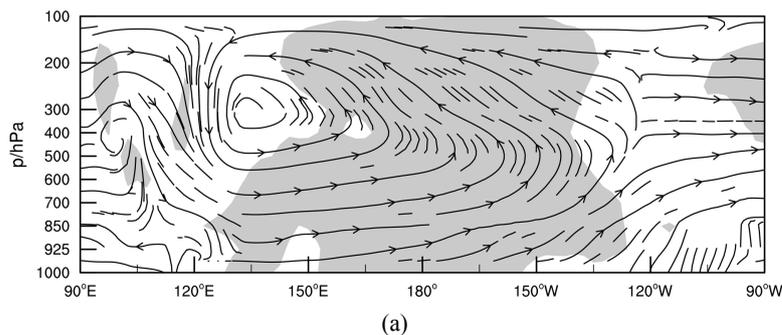


阴影区为通过了 95%的信度检验区。

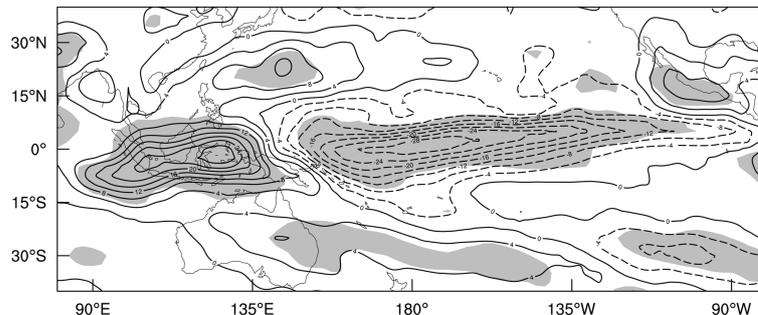
Figure 6. Composite differences of the sea level pressure field anomalies corresponding to the strong and weak years of Ni-no3.4 in summer (units: hPa)

图 6. 夏季 Nino3.4 暖、冷位相年对应的 SLP 场距平合成差值(单位: hPa)

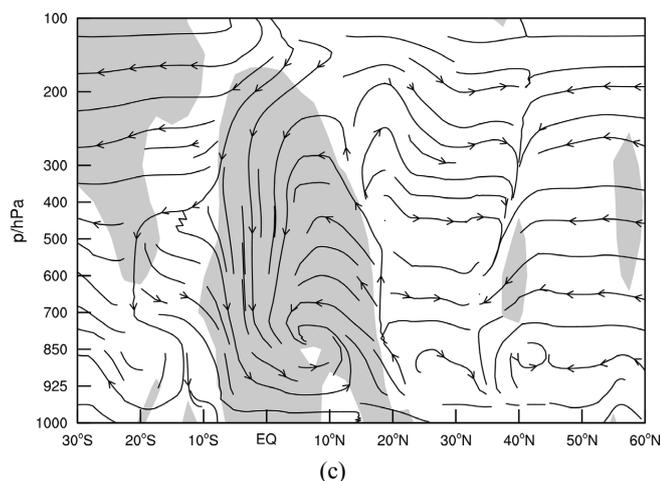
图 7 分别为夏季 Nino3.4 暖、冷位相年对应的沿赤道太平洋垂直环流距平合成差值(图 7(a))、OLR 场距平合成差值图(图 7(b))以及夏季 Nino3.4 正、负异常年对应的东亚地区经圈环流距平的纬度 - 高度剖面合成差值(图 7(c))。当夏季赤道中东太平洋 SSTA 偏暖时引起海表湍流热通量增加, 其上空大气受热产生



(a)



(b)



阴影区为通过了 95%的信度检验区。

**Figure 7.** Composite differences of the vertical circulation along the equatorial Pacific (a), OLR field ((b), unit:  $W \cdot m^{-2}$ ) and the composite differences of latitude-height vertical profile of meridional circulation over East Asia ((c), meridional wind speed unit:  $m \cdot s^{-1}$ , vertical velocity unit:  $0.01 Pa \cdot s^{-1}$ ) anomalies corresponding to the strong and weak years of Nino3.4 in summer (units:  $m \cdot s^{-1}$ )

**图 7.** 夏季 Nino3.4 暖、冷位相年对应的沿赤道太平洋垂直环流距平成差值((a)纬向风速单位:  $m \cdot s^{-1}$ , 垂直速度单位:  $0.01 Pa \cdot s^{-1}$ )、OLR 场距平成差值((b), 单位:  $W \cdot m^{-2}$ )及东亚地区经圈环流距平的纬度 - 高度剖面合成差值((c) 经向风速单位:  $m \cdot s^{-1}$ , 垂直速度单位:  $0.01 Pa \cdot s^{-1}$ )

上升运动(图 7(a)), OLR 表现为异常负值区, 对流活动明显偏强(图 7(b)), 而在赤道西太平洋地区出现下沉运动(图 7(a)), OLR 表现为异常正值区, 对流活动明显偏弱(图 7(b)), 对流层低层在赤道太平洋上为西风异常, Walker 环流明显减弱(图 7(a)); 与此同时, 东亚地区局地 Hadley 环流表现为异常偏弱(图 7(c)), 使得低空 SCEF 异常增强在  $20^{\circ}N$  附近与来自北半球的冷空气交汇上升; 反之亦然。

## 6. 结论

本文利用 NCEP/NCAR 逐月的风场、海平面气压场以及 HadISST 逐月海表面温度等再分析资料, 研究了夏季赤道中东太平洋 SSTA 对 SCEF 强度变化的可能影响, 得到以下主要结论:

1) 夏季 SCEF 强度变化与同期赤道中东太平洋 SSTA 呈显著的正相关关系, 二者的相关系数达 0.52, 通过 0.01 的显著性水平检验。

2) 夏季赤道中东太平洋 SSTA 对 SCEF 年际变化产生重要影响; 而夏季赤道西太平洋及海洋性大陆区 SSTA 主要受大气影响, 不是影响 SCEF 的主要因子。

3) 当夏季赤道中东太平洋 SSTA 增暖时, Walker 环流异常减弱, 赤道西太平洋出现异常下沉运动, 位于赤道西太平洋的海洋性大陆和澳大利亚北部 SLP 异常上升; 与此同时, 东亚 Hadley 环流异常减弱, 使得西北太平洋 SLP 异常降低, 有利于产生南北向的气压梯度, 从而引导 SCEF 增强。

本文研究结果表明, 夏季 SCEF 的强度变化与同期赤道中东太平洋 SSTA 关系密切, 由此说明赤道中东太平洋 SSTA 在 SCEF 的形成和维持中的地位, 有利于进一步理解和认识亚洲夏季风环流与海温的相互作用。本文的研究仅是对夏季赤道中东太平洋海温异常对 SCEF 可能影响的初步分析, 有待利用数值模拟作进一步研究。

## 基金项目

干旱气象科学研究基金(IAM202108)资助。

## 参考文献

- [1] 赵晓琳. 2018 年我国梅雨特征及梅雨期降水异常成因分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(3): 29-33.
- [2] 郭兴亮, 黄珊. 越赤道气流不同波长分量对台风 Megi (2010) 路径偏折的影响与模拟检验[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(2): 90-96.
- [3] 李崇银, 吴静波. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用[J]. 大气科学, 2002, 26(2): 185-192.
- [4] 程智, 高辉, 曹勇. 索马里越赤道气流与淮河流域夏季降水关系的年代际增强[J]. 大气科学, 2018, 42(6): 1363-1377.
- [5] 朱晓炜, 孙银川, 谭志强, 等. 索马里越赤道气流的变化特征及其对西北地区东部夏季降水的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(2): 7-12.
- [6] 张好晴, 林爱兰, 温之平. 南海周边越赤道气流的多时间尺度变化特征及其与环流和降水的关系[J]. 热带气象学报, 2019, 35(4): 504-516.
- [7] 李忠贤, 范倩莹, 曾刚, 等. 盛夏南海低空越赤道气流变化与东亚夏季风的联系[J]. 热带气象学报, 2018, 34(3): 339-346.
- [8] 毛天松, 徐启春, 许乃猷. 105 °E 越赤道气流与亚洲夏季风的相互关系[J]. 海洋预报, 1990, 7(4): 1-7.
- [9] 刘向文, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 105 °E 和 125 °E 越赤道气流与南、北半球环流变化的关系[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 443-458.
- [10] 丛菁, 管兆勇, 王黎娟. 夏季亚澳季风区两支越赤道气流年(代)际变化及其与夏季风活动的联系[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 779-785.
- [11] 张冬峰, 王永光, 张国宏. 西太平洋暖池海温和山西盛夏降水关系研究[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(3): 60-67.
- [12] 杨建玲, 李艳春, 穆建华, 等. 热带印度洋海温与西北地区东部降水关系研究[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 690-699.
- [13] 周建琴, 晏红明. 东部和中部型 El Niño 事件对云南冬季降水影响的差异分析[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 98-108.
- [14] 李菲, 李辑, 管兆勇. 我国东北夏季气温年代际变化特征及与太平洋海温异常关系的研究[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(3): 19-26.
- [15] Halpern, D. and Woiceshyn, P.M. (2001) Somali Jet in the Arabian Sea, El Nino, and India Rainfall. *Journal of Climate*, **14**, 434-441. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0434:SJITAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0434:SJITAS>2.0.CO;2)
- [16] 汪卫平, 杨修群. 索马里急流变异及其与东亚夏季风和中国降水异常的关系[J]. 气象科学, 2008, 28(2): 139-146.
- [17] 韩慎友. 越赤道气流时空变化特征及其与我国夏季降水和西北太平洋热带气旋发生频数的关系[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京气象学院, 2002.
- [18] Zhu, Y.L. (2012) Variations of the Summer Somali and Australia Cross-Equatorial Flows and the Implications for the Asian Summer Monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, **29**, 509-518. <https://doi.org/10.1007/s00376-011-1120-6>
- [19] 王会军, 薛峰. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 18-25.
- [20] 曾刚, 孙照渤, 邓伟涛, 等. 不同海域 SSTA 对东半球越赤道气流年代际变化影响的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2011, 27(5): 609-618.
- [21] 邱金晶, 孙照渤, 邓伟涛. 夏季索马里越赤道气流垂直结构的年代际变化[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 318-336.
- [22] Li, C. and Li, S.L. (2014) Interannual Seesaw between the Somali and the Australian Cross-Equatorial Flow and Its Connection to East Asian Summer Monsoon. *Climate*, **27**, 3966-3981. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00288.1>
- [23] 陈兵, 郭品文, 向渝川. 夏季低空越赤道气流与 ENSO 的关系[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 36-43.
- [24] 施宁, 施丹平, 严明良. 夏季越赤道气流对南海季风及华东旱涝的影响[J]. 热带气象学报, 2001, 17(4): 405-414.
- [25] 刘秦玉, 王韶霞. 印度尼西亚群岛邻近海域 SST 对越赤道气流的影响[J]. 大气科学, 2000, 24(5): 634-640.
- [26] 彭维耿, 蒋尚城. 越赤道气流特征及其年际变化特征初探[J]. 热带气象学报, 2003, 19(1): 87-93.
- [27] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., et al. (1996) The NCEP/NCAR40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- [28] Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., et al. (2003) Global Analyses of Sea Surface Temperature, Sea Ice, and Night Marine Air Temperature since the Late Nineteenth Century. *Journal of Geophysical Research*, **108**, 4407-4435. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>

- 
- [29] Yu, L. and Weller, R.A. (2007) Objectively Analyzed Air-Sea Heat Fluxes for the Global Ice-Free Oceans. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **8**, 527-539. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-4-527>
- [30] Cayan, D.R. (1992) Latent and Sensible Heat Fluxes Anomalies over the Northern Oceans: Driving the Sea Surface Temperature. *Journal of Physical Oceanography*, **22**, 859-881. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1992\)022<0859:LASHFA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022<0859:LASHFA>2.0.CO;2)
- [31] 张蓬勃, 管兆勇, 刘蕾, 等. 与澳高相关的海洋性大陆区域海温异常对中国夏季气候的可能影响[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 188-197.