

热带太平洋与热带大西洋的海温梯度统计关系研究

范潇丹

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: 1098660098@qq.com

收稿日期: 2020年11月1日; 录用日期: 2020年11月12日; 发布日期: 2020年11月19日

摘要

本文用英国哈德莱中心的全球海面温度(HadISST)数据集, 先后通过海温距平场、九年滑动平均、相关分析的方法, 分析了1900~2019年热带太平洋与大西洋海温距平分布特征及海温梯度统计关系。得出结论如下: 1) 热带太平洋年平均海温总体呈现西高东低的分布特征, 热带大西洋为带状分布, 海温从低纬向高纬递减。热带太平洋与热带大西洋海温距平均在春季与冬季表现为: 赤道以北海温以负距平为主, 赤道以南以及赤道附近海温以正距平为主。夏季与秋季则相反。热带东太平洋海温距平在春季与秋季呈递增趋势。热带西太平洋四季海温距平变化趋势均为先降低后升高。热带东西大西洋四季海温距平变化趋势表现为上下起伏。2) 热带太平洋海温梯度与大西洋海温梯度在春季存在显著的负相关关系, 热带太平洋海温梯度与北大西洋海温距平呈现中等的负相关, 热带大西洋海温梯度与太平洋中部海温距平呈中等的正相关关系。

关键词

热带太平洋, 热带大西洋, 海温梯度, 相关分析

A Study on the Statistical Relationship of SST Gradient between the Tropical Pacific Ocean and the Atlantic Ocean

Xiaodan Fan

Academy of Atmospheric Sciences of Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: 1098660098@qq.com

Received: Nov. 1st, 2020; accepted: Nov. 12th, 2020; published: Nov. 19th, 2020

Abstract

This paper used the data set of global sea surface temperature (HadISST) from Hadley Center in the UK. By using the method of nine-year moving average and correlation analysis, this paper analyzes the distribution characteristics of seasonal sea surface temperature anomaly (SSTA) in the tropical Pacific Ocean and Atlantic Ocean and the relationship between them from 1900 to 2019. The conclusions are as follows: 1) The annual average SST in the tropical Pacific Ocean is generally high in the West and low in the East. SST in the tropical Atlantic shows a zonal distribution, and decreases from low latitudes to high latitudes. In spring and winter, the SSTA in tropical Pacific and tropical Atlantic Ocean is mainly negative in the north of the equator, and positive in the south and near the equator, while in summer and winter, it's opposite. In spring and autumn, the SSTA of the tropical East Pacific is increasing. The trend of SSTA in the western tropical Pacific is decreasing first and then increasing. The trend of SSTA in the four seasons in the East and West Atlantic of the tropics shows ups and downs. 2) There is a significant negative correlation between the SST gradient of the tropical Pacific and the Atlantic in spring, a medium negative correlation between the SST gradient of the Pacific and the SSTA of the North Atlantic, and a medium positive correlation between the SST gradient of the tropical Atlantic and the SSTA of the Central Pacific.

Keywords

Tropical Pacific, Tropical Atlantic, SST Gradient, Correlation Analysis

Copyright © 2020 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

热带太平洋与大西洋作为世界上最大的两片海洋，海域辽阔，气候多样。热带太平洋海平面温度(SST)对全球气候变化的影响是巨大的。如厄尔尼诺是赤道太平洋海温梯度异常的结果，造成全球气候与大气环流异常[1]。而热带北大西洋海温异常也会通过影响气旋性环流，使我国盛夏华中地区降水偏多[2]。此外，20世纪的大西洋变暖可能抑制了太平洋东部的暖化，大西洋变暖改变了沃克环流，进而导致中-东太平洋下沉运动和东风表面风异常，这些东风表面风异常在赤道太平洋引起耦合的海洋反馈，最终演变成类似拉尼娜现象的平均状态[3]。所以热带太平洋与大西洋的海温是存在一定统计关系的，这也是本文将要着重研究的。

针对热带太平洋与大西洋海温随时间的变化特征及两者之间的联系，张启龙等[4]研究了西太平洋暖池海区 SST 的时空变化特征。董璐等[5]分析了 20 世纪太平洋 SSTA 的时间变化特征。Coats S 等[6]分析了热带太平洋纬向海面温度梯度(SST 梯度)的历史变化趋势。Liang Ning 等[7]研究了自然强迫和人为强迫对热带太平洋纬向海表温度梯度的影响。曲金华等[8]指出，1981 年以来，冬季的北大西洋中部 SST 维持偏高状态。郑健等[9]对大西洋影响赤道中东太平洋 SST 的途径做了详细的阐述。Carkis A. Repelli 等[10]指出热带太平洋和热带大西洋北部的海温正相关，热带太平洋和南大西洋的海温相关可以忽略不计。而陈迪等[11]指出，西太平洋副热带高压与热带中东太平洋 SST 呈显著的正相关关系。

本文在前人研究成果的基础上，研究了热带太平洋与热带大西洋的海温梯度在各个季节上的变化特征及统计关系，为更进一步探究热带太平洋与热带大西洋的相互作用及其对全球气候与大气环流的影响提供了背景资料。

2. 资料与方法

2.1. 资料概况

本研究中使用的每月 SST 数据集(1900~2019)全部来自哈德莱中心的全球海冰和海表温度(HadISST)分析数据集,选取了海表温度 SST 数据。HadISST1 的优点是分辨率和精度较高,缺测值较少。该数据时间长度为 1900 年 1 月至 2019 年 12 月,空间范围为 90°S~90°N, 0°E~359°E,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,数据格式为 netcdf 格式,使用的变量为海面温度。

2.2. 研究方法

2.2.1. 距平

距平表现了气候变量与正常情况的偏离,距平序列由一组气候变量数据 x_1, x_2, \dots, x_n 与其均值 \bar{x} 之差构成,即

$$x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x} \quad (1)$$

2.2.2. 滑动平均法

滑动平均法就是沿数据在逐一小区间上,不断对样本量为 m 的非稳定数据 y 作局地平均,从而滤去其随机误差,得到更平滑的结果。其一般表达式为:

$$\hat{y}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{k+j-1} \quad (k=1, 2, \dots, m?n+1) \quad (2)$$

其中 n 表示用每 n 个相邻非平稳数据的均值,表示 n 个非平稳数据中每一个的取值。 n 越大则平滑作用越强。

2.2.3. 相关分析及其显著性检验

相关系数可用于测量两个气象要素之间的相关性。设样本数为 n 的两个变量 x_n 和 y_n , 其相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

其中 \bar{x}, \bar{y} 分别表示变量 x_n 和 y_n 的均值。相关系数的取值范围为-1.0 至 1.0,数值越接近 1.0,则正相关越强,越接近-1.0,则负相关越强。 $r=0$ 则表示两者相互独立。判断相关系数是否显著,还需进行显著性检验,本文采取的是 t 检验的方法。

$$t = \sqrt{n-2} \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (4)$$

其中 $n-2$ 代表 t 分布的自由度, r 代表相关系数,给定显著性水平 α ,查 t 分布表可得 t_α ,如果 $t > t_\alpha$,则认为相关系数通过显著性检验。

3. 热带太平洋与大西洋海面温度平均与区域平均

3.1. 热带太平洋与大西洋海面温度年平均

本节对 120 年(1900~2019 年)的 SST 海温数据进行时间平均,得到热带太平洋与热带大西洋的海温空间分布图,并对两者进行横向对比。为了便于描述,本文将 $5^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$, $80^\circ\text{W} \sim 150^\circ\text{W}$ 范围的海区定义为热

带东太平洋(EPac), $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{E}$ (跨 180° 经线)范围的海区定义为热带西太平洋(WPac)。将 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\text{W}\sim 20^{\circ}\text{W}$ 范围的海区定义为热带东太平洋(EAtl), $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $25^{\circ}\text{W}\sim 45^{\circ}\text{W}$ 范围的海区定义为热带西大西洋(WAtl), 如图 1 中绿框区域。

从图 1 可看出, 热带西太平洋具有明显的暖池, 暖池中心温度最高, 周围逐渐递减。而东太平洋冷舌温度明显低于周围海域, 东太平洋从纬向上看, 呈现明显的北暖南冷的分布特征, 海温由南向北递增。对于西热带太平洋暖池和东太平洋冷舌的形成原因, 吴增茂等[12]进行了解释。

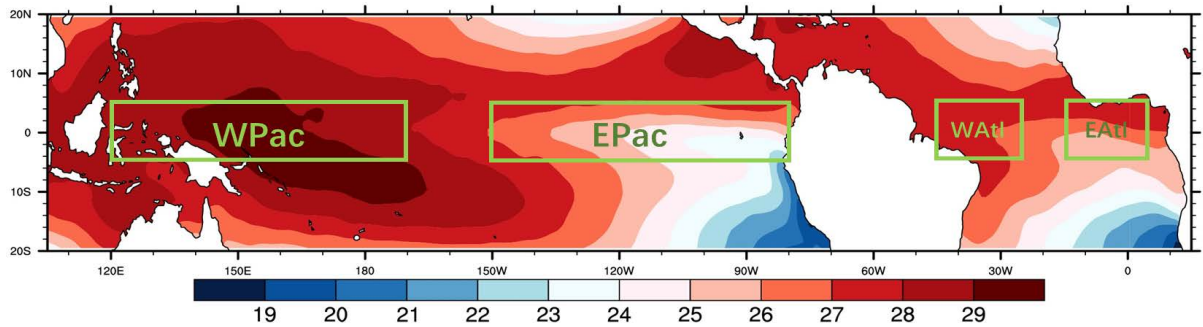


Figure 1. Annual mean SST in tropical Pacific and tropical Atlantic

图 1. 热带太平洋与热带大西洋的海温年平均(1900~2019年)

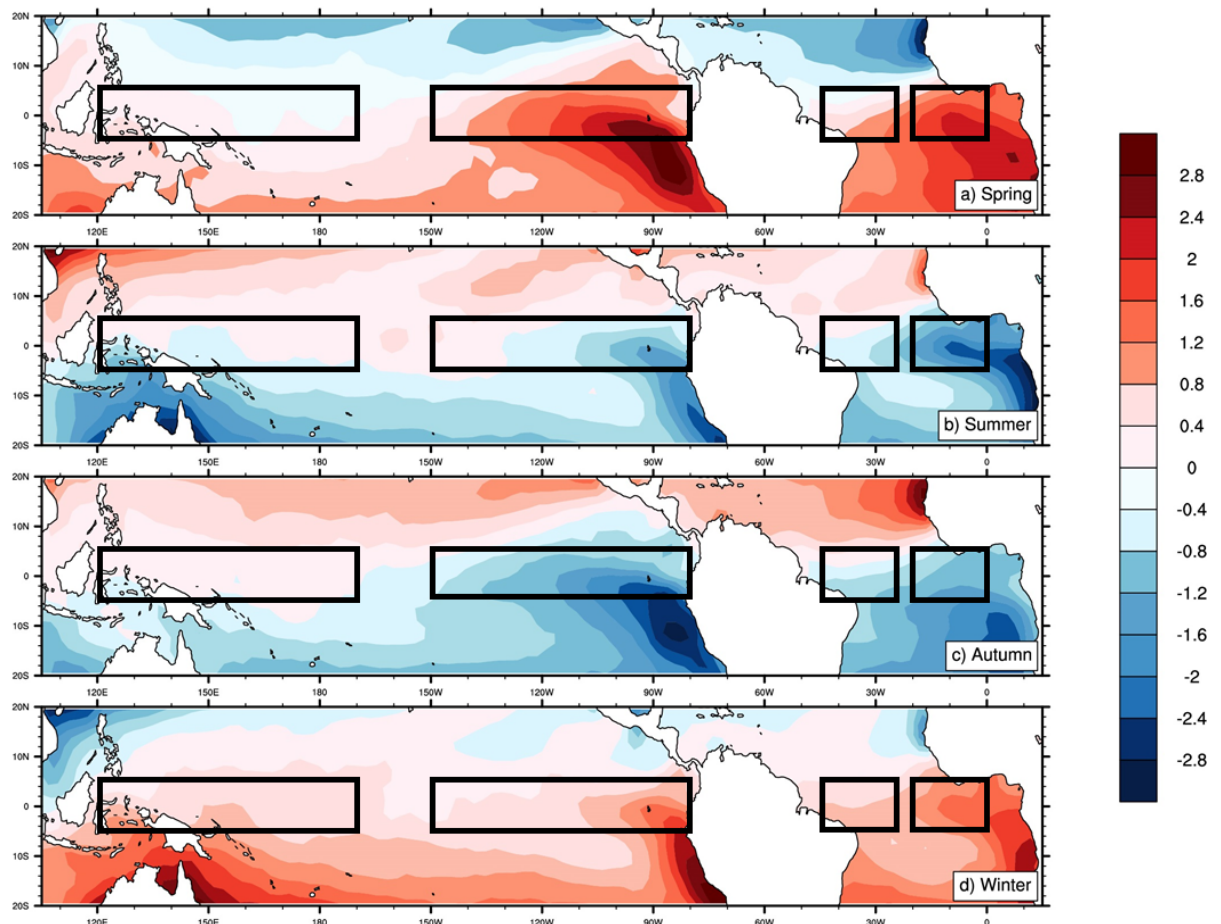


Figure 2. Seasonal anomaly of SST in the Pacific and Atlantic Ocean

图 2. 热带太平洋与热带大西洋的海温季节距平

3.2. 热带太平洋与大西洋海温距平季节平均

本文通过计算 120 年(1900~2019 年)海温季节距平场, 分析得到热带太平洋与大西洋不同季节的海温变化特征。如图 2 所示, 热带太平洋与热带大西洋海温距平均在春季与冬季表现为: 赤道以北海温以负距平为主, 赤道以南以及赤道附近海温以正距平为主。夏季与秋季则相反。从图 2 中可以看到, 春季与秋季的海温距平分布特征极为相似: 秋季整体上海温自南向北递增, 春季反之, 仅距平正负相反, 赤道附近的東西太平洋存在明显的海温梯度。夏季与冬季的海温距平分布特征同理: 夏季整体上海温自南向北递增, 冬季反之。

3.3. 热带太平洋东西海温距平区域平均

本节分别选取热带东太平洋(EPac)和西太平洋(WPac)海域进行海温四季的区域平均计算, 得到了 120 年(1900~2019 年)海温变化的时间序列。为了突出海温年代际的变化, 本文对区域平均与海温梯度进行了九年滑动平均, 滤去了年际波动。得到了如图 3 所示的曲线图, 其中蓝虚线代表区域平均, 红实线代表九年滑动平均后的海温区域平均, 黑实线为零参考线。

从图 3 可知, 热带东太平洋海温距平在春季和秋季海温整体表现为递增趋势。如图 4 所示, 热带西太平洋四季的海温距平变化趋势均为先降低后升高, 在 1900 年至 1970 年递减, 1970 年至今迅速升高。

3.4. 热带大西洋东西海温距平区域平均

图 5 和图 6 分别表示热带东、西大西洋海温四季的区域平均。如图 5 所示, 热带东大西洋春冬季海温变化特征为上下起伏, 其波峰分别位于 1940 年、1964 年、2008 年。夏季与秋季则在 1900~1964 年存在先递增后递减的过程, 波峰位于约 1940 年。

图 6 中热带西大西洋的海温距平四季约在 1900~1935 年递增, 1935~1980 年递减, 1980 年至今递增。

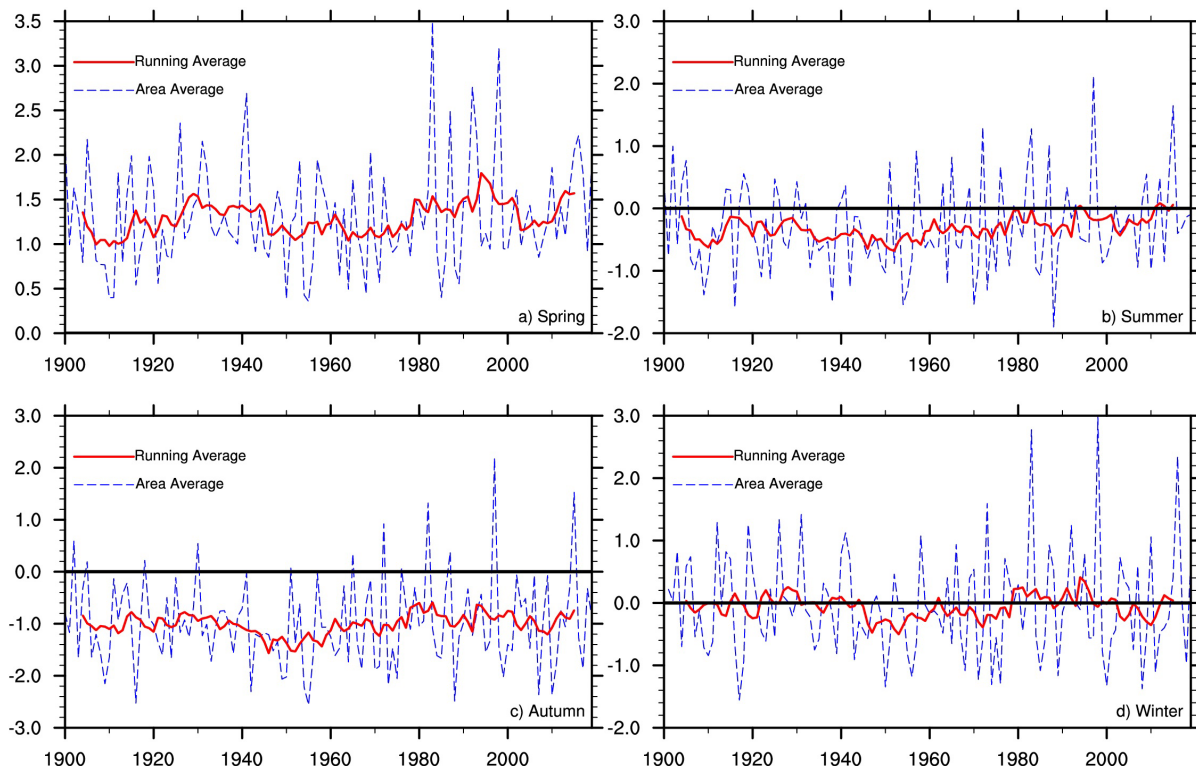


Figure 3. Seasonal regional mean of SST anomalies in the tropical eastern Pacific

图 3. 热带东太平洋海温距平的季节区域平均

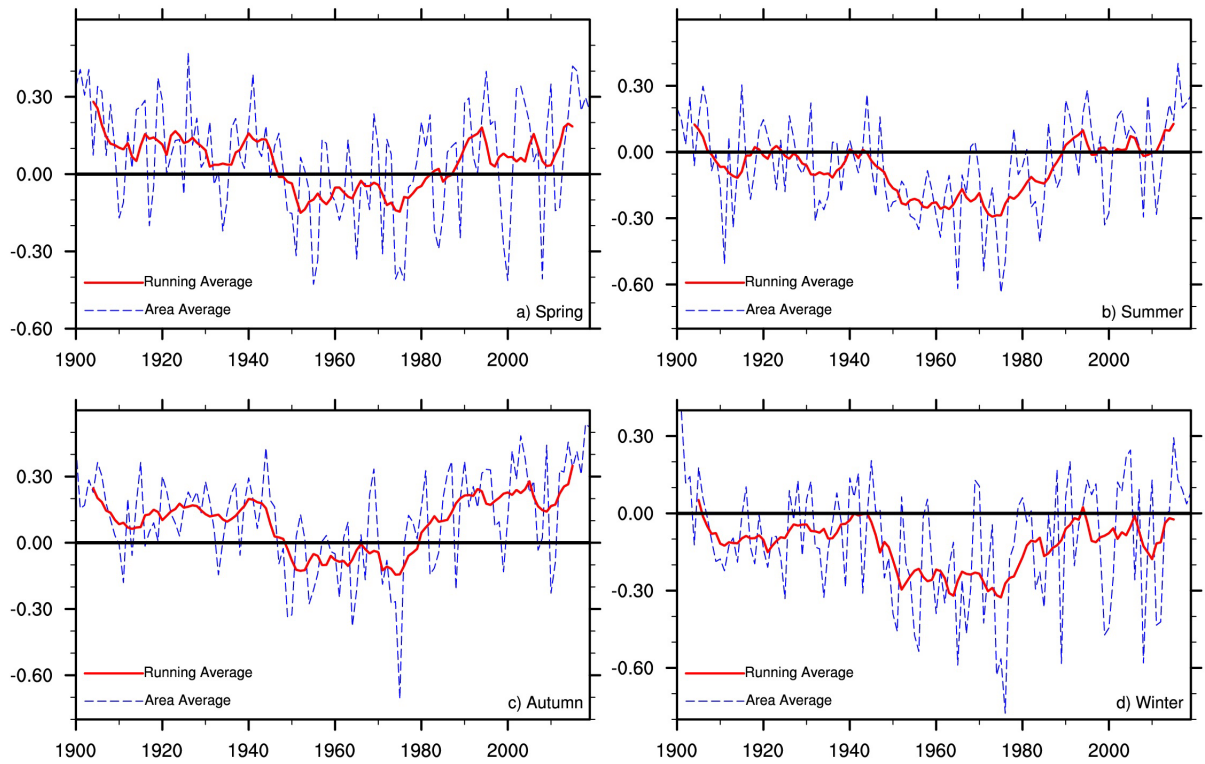


Figure 4. Seasonal regional mean of SST anomalies in the tropical western Pacific

图 4. 热带西太平洋海温距平的季节区域平均

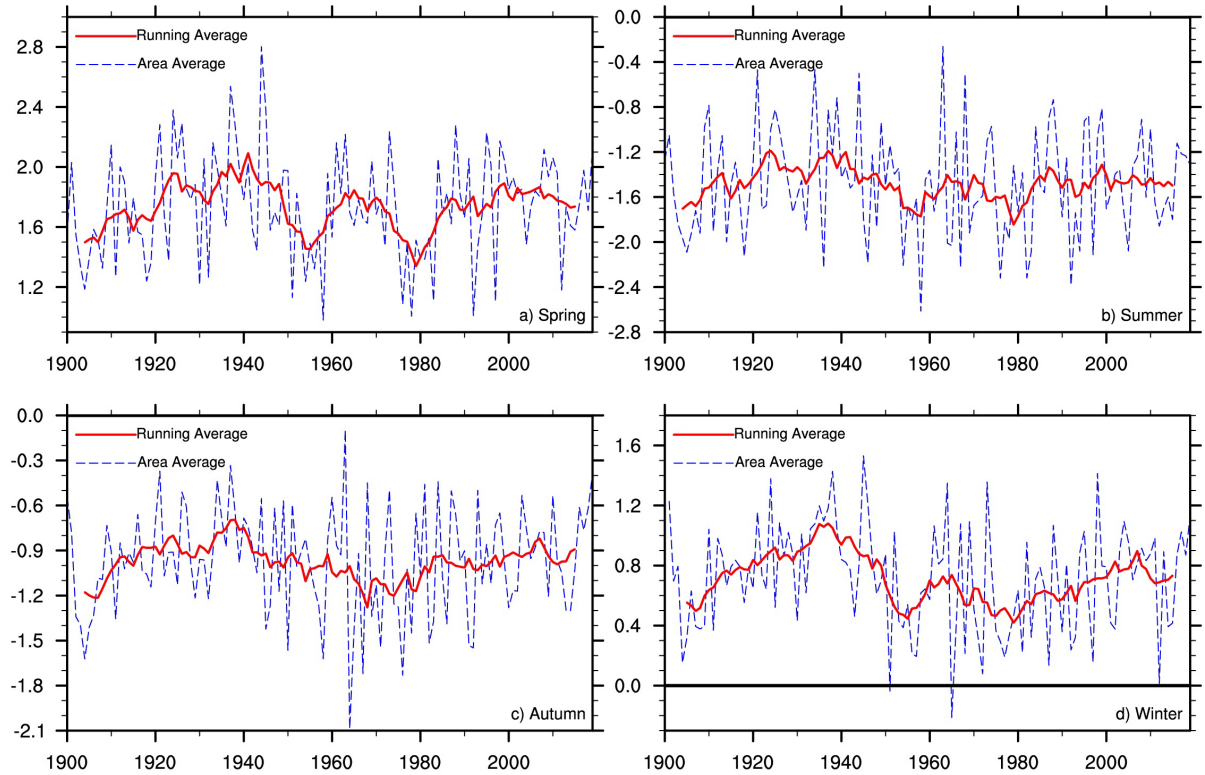


Figure 5. Seasonal regional mean of SST anomalies in the tropical eastern Atlantic

图 5. 热带东大西洋海温距平的季节区域平均

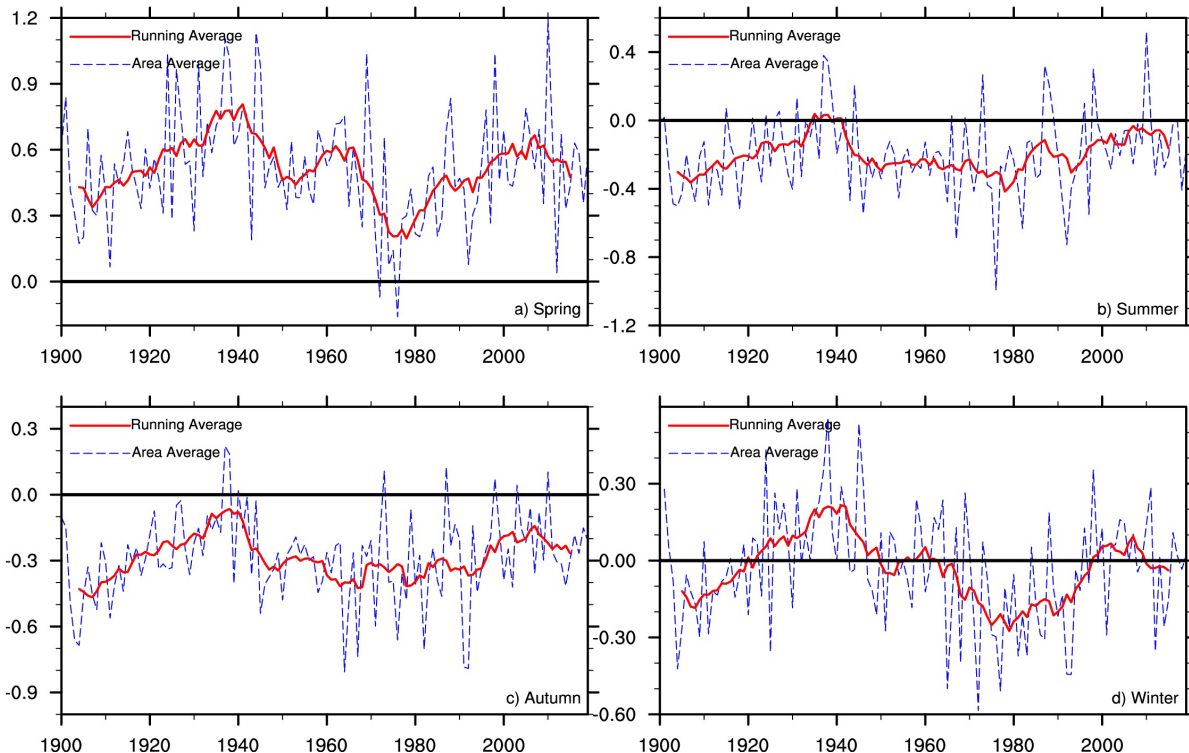


Figure 6. Seasonal regional mean of SST anomalies in the tropical western Atlantic

图 6. 热带西大西洋海温距平的季节区域平均

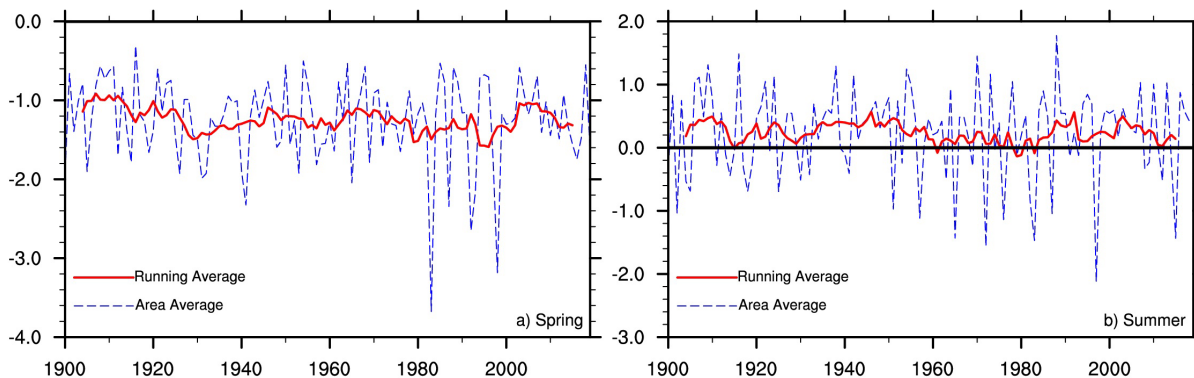
4. 热带太平洋与大西洋海温梯度及相关性

4.1. 热带太平洋海温梯度

本节定义热带太平洋海温梯度为热带西太平洋与热带东太平洋海温区域平均之差(WPac-EPac)。如图 7 所示, 热带太平洋海温梯度在春季为负值, 而秋季多为正值, 意味着春季热带西太平洋海温低于东太平洋, 秋季反之。

4.2. 热带大西洋海温梯度

本节定义热带大西洋海温梯度为热带西大西洋与热带东大西洋海温区域平均之差(WAtl-EAtl)。如图 8 所示, 热带大西洋海温梯度春季与冬季为负值, 在夏季与秋季为正值, 意味着春季与冬季热带西大西洋海温低于东大西洋, 而夏季与秋季热带西大西洋海温高于东大西洋。



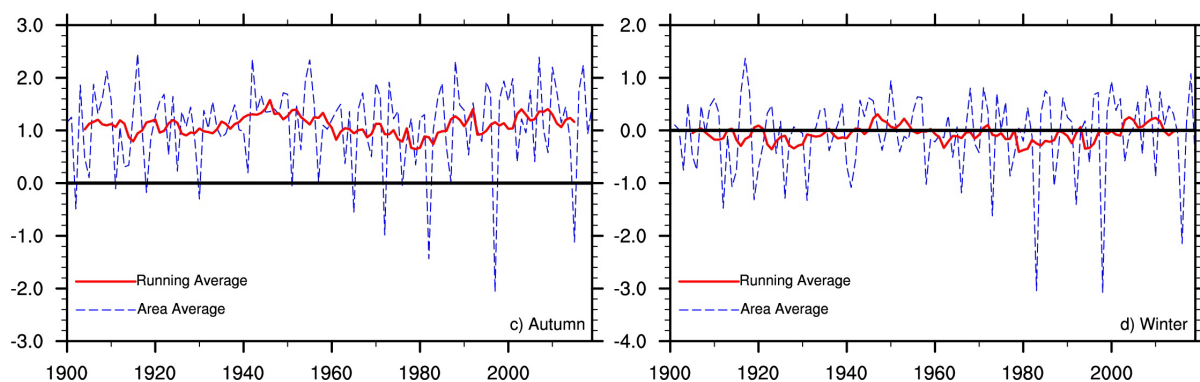


Figure 7. SST gradient in tropical Pacific

图 7. 热带太平洋海温梯度

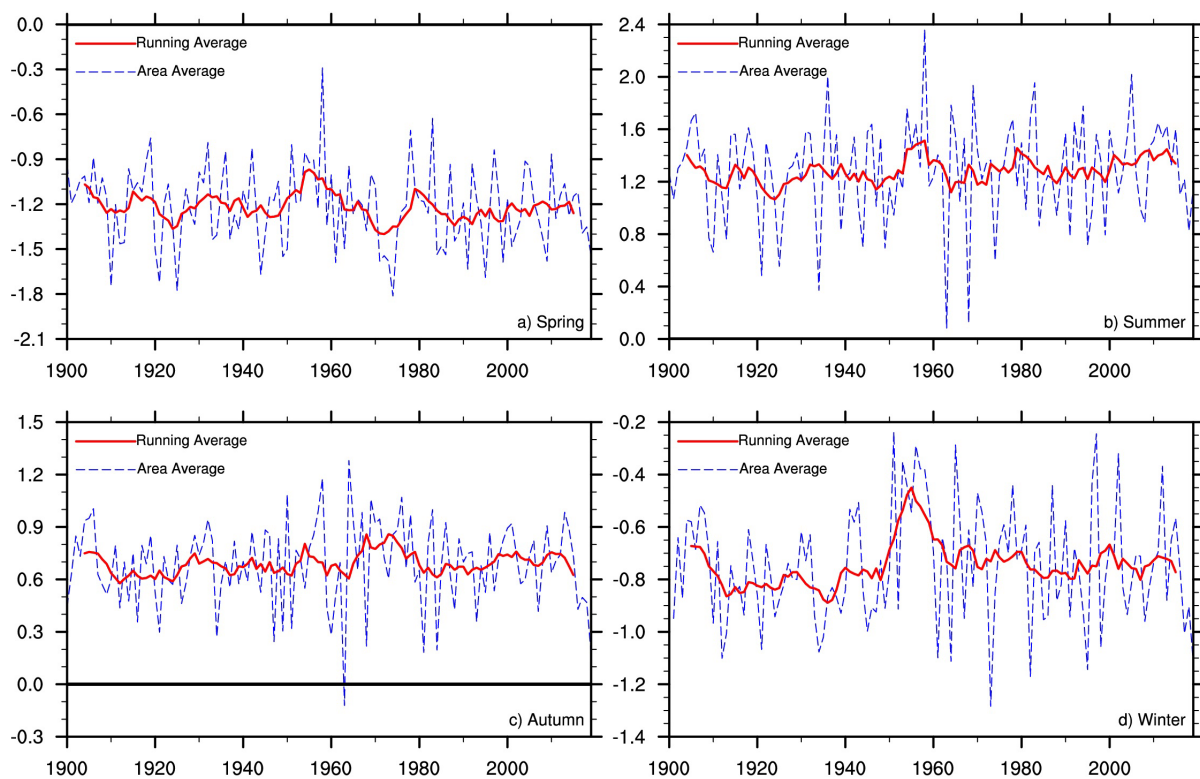


Figure 8. SST gradient in tropical Atlantic

图 8. 热带太平洋海温梯度

4.3. 热带太平洋海温梯度与大西洋海温梯度的相关系数

本文对热带太平洋与热带大西洋的海温梯度进行了相关分析，还通过 t 检验的方法对相关系数进行了显著性检验。结果如图 9 所示，春季相关系数达到 -0.25 ，且通过了 99% 的显著性检验，可以认为春季两者存在显著的负相关关系，而其他季节的相关性较低。

4.4. 热带太平洋海温梯度与太平洋和大西洋海温距平的相关系数

图 10 表示热带太平洋海温梯度与太平洋和大西洋海温距平的相关系数，其中打点区域表示通过了 99% 以上的显著性检验。从图 10 中可看出热带太平洋海温梯度分别与东西太平洋海温距平呈显著的负正

相关关系。春季太平洋海温梯度与热带北大西洋海温距平呈现中等的负相关关系。表示春季当太平洋海温梯度增强(或减弱)时, 对应北大西洋变冷(或变暖)。总体来看, 热带太平洋海温梯度与赤道大西洋海温距平, 特别是在夏季, 呈现一定的正相关关系, 这与 Kucharski 等(2011)的结论是一致的。

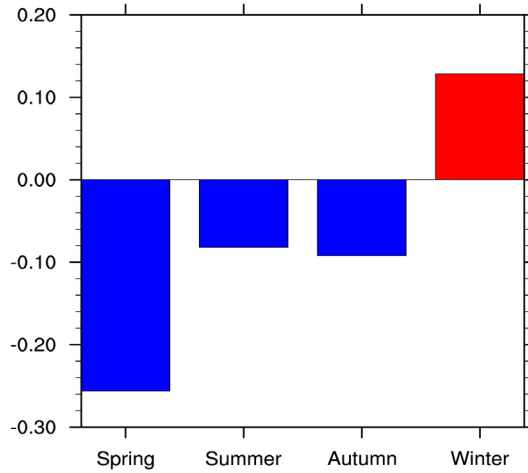


Figure 9. The correlation of SST between the Pacific SST gradient and the Atlantic SST gradient

图 9. 热带太平洋海温梯度与大西洋海温梯度的相关系数

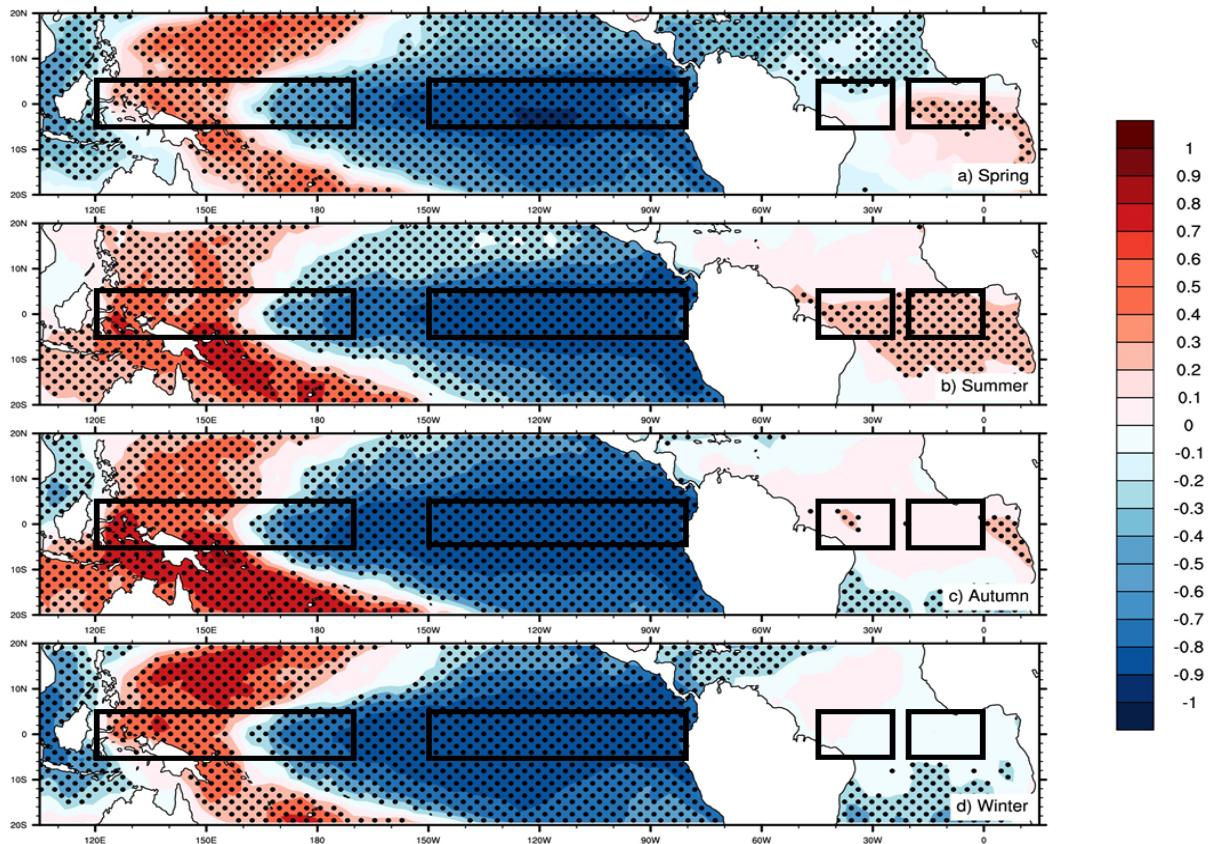


Figure 10. Correlation between the Pacific SST gradient and SSTA over the tropical Pacific and Atlantic

图 10. 热带太平洋海温梯度与太平洋和大西洋海温距平的相关系数

4.5. 热带大西洋海温梯度与太平洋和大西洋海温距平的相关性

图 11 表示热带大西洋海温梯度与太平洋和大西洋海温距平的相关系数，热带大西洋海温梯度与东大西洋海温距平在四个季节均表现为较强的负相关关系，而分别与南北大西洋存在强的负正相关。意味着当热带大西洋海温梯度增强(或减弱)时，东大西洋变冷(或变暖)，北大西洋变暖(或变冷)，南大西洋变冷(或变暖)。在春季与夏季，热带大西洋海温梯度与东太平洋与太平洋中部海温距平为中等的正相关关系。这意味着当热带大西洋海温梯度减弱，即东大西洋海温升高时，对应太平洋中部及东部海温降低。这可能是由于赤道东大西洋海温上升产生向上的气流，于太平洋中部下沉，有助于使太平洋跃层变浅，并以与上升流开尔文波一致的速度向东传播。整个过程中 Bjerknes 反馈增强了东西向海温梯度，并可能使次年冬天拉尼娜现象盛行于太平洋[13]。

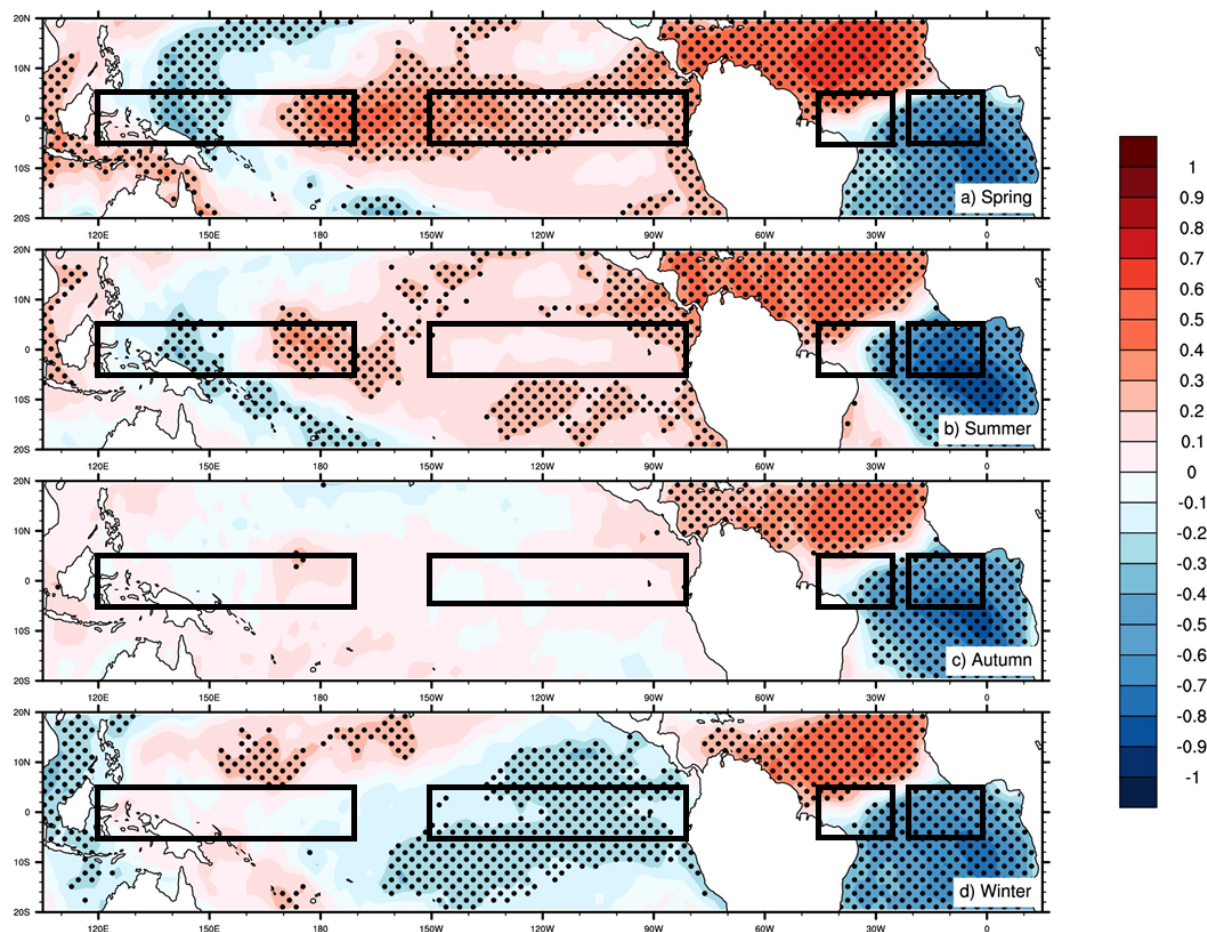


Figure 11. Correlation between the Atlantic SST gradient and SSTA over the tropical Pacific and Atlantic
图 11. 热带大西洋海温梯度与太平洋和大西洋海温距平的相关系数

5. 结论

本文通过分析热带太平洋与大西洋海温分布特征及海温梯度统计关系，得出以下结论：

1) 热带太平洋年平均海温总体呈现西高东低的分布特征，西太平洋为团状分布，中心海温最高，南部自西向东递减。热带大西洋为带状分布，海温从低纬向高纬递减。热带太平洋与热带大西洋海温距平在春季与冬季表现为：赤道以北海温以负距平为主，赤道以南以及赤道附近海温以正距平为主。夏季与

秋季则相反。

2) 热带东太平洋海温距平在春季与秋季呈递增趋势。热带西太平洋四季海温距平变化趋势均为先降低后升高。热带东大西洋海温距平在春季与冬季 120 年(1900~2019 年)间有三个先递增后递减的过程;夏季与秋季在 1900~1964 年先递增后递减。热带西大西洋的海温距平四季约在 1900~1935 年递增,1935~1980 年递减,1980 年至今递增。

3) 热带太平洋海温梯度在春季为负值,而秋季多为正值,热带大西洋海温梯度春季与冬季为负值,在夏季与秋季为正值。热带太平洋海温梯度与大西洋海温梯度在春季存在显著的负相关关系。春季热带太平洋海温梯度与北大西洋海温距平呈现中等的负相关,热带大西洋海温梯度与太平洋中部海温距平为中等的正相关关系,并可能因此在次年冬天使拉尼娜盛行于太平洋。

致 谢

感谢成都信息工程大学四年的培养。

参考文献

- [1] Dai, A. and Wigley, T.M.L. (2000) Global Patterns of ENSO-Induced Precipitation. *Geophysical Research Letters*, **27**, 1283-1286. <https://doi.org/10.1029/1999GL011140>
- [2] 李忠贤, 陈晨, 曾刚, 邓伟涛, 吴玲玲. 春季热带大西洋北部海温异常与我国盛夏降水异常的联系[J]. 热带气象学报, 2019, 35(6): 756-766.
- [3] Kucharski, F., Kang, I.-S., Farneti, R. and Feudale, L. (2011) Tropical Pacific Response to 20th Century Atlantic Warming. *Geophysical Research Letters*, **38**, No. 3. <https://doi.org/10.1029/2010GL046248>
- [4] 张启龙, 翁学传, 颜廷壮. 西太平洋暖池海域 SST 场的时空特征[J]. 海洋与湖沼, 2001(4): 349-354.
- [5] 董璐, 周天军. 20 世纪太平洋海温变化中人为因子与自然因子贡献的模拟研究[J]. 海洋学报(中文版), 2014(3): 48-60.
- [6] Coats, S. and Karnauskas, K.B. (2017) Are Simulated and Observed Twentieth Century Tropical Pacific Sea Surface Temperature Trends Significant Relative to Internal Variability? *Geophysical Research Letters*, **44**, 9928-9937. <https://doi.org/10.1002/2017GL074622>
- [7] Ning, L., Liu, J., Wang, Z. and Bradley, R.S. (2018) Different Influences on the Tropical Pacific SST Gradient from Natural and Anthropogenic Forcing. *International Journal of Climatology*, **38**, 2015-2028. <https://doi.org/10.1002/joc.5313>
- [8] 曲金华, 江志红, 谭桂容, 孙力. 冬季北大西洋海温年际、年代际变化与中国气温的关系[J]. 地理科学, 2006(5): 5557-5563.
- [9] 郑建, 刘秦玉. 热带太平洋与热带大西洋海表温度主模态的相互作用[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(6): 799-806.
- [10] Uvo, C.B., Repelli, C.A., Zebiak, S.E. and Kushnir, Y. (1998) The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation. *Journal of Climate*, **11**, 551-562. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011%3C0551:TRBTPA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011%3C0551:TRBTPA%3E2.0.CO;2)
- [11] 陈迪, 陈锦年, 左涛. 西太平洋副热带高压变化与赤道太平洋海温场的联系[J]. 海洋学报(中文版), 2013(6): 23-32.
- [12] 吴增茂, 吴德星, 盛立芳. 赤道西太平洋暖池形成原因探讨[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 1993(S2): 147-152.
- [13] Rodríguez-Fonseca, B., Polo, I., García-Serrano, J., Losada, T., Mohino, E., Mechoso, C.R. and Kucharski, F. (2009) Are Atlantic Niños Enhancing Pacific ENSO Events in Recent Decades? *Geophysical Research Letters*, **36**, L20705, <https://doi.org/10.1029/2009GL040048>