

热带大西洋海温梯度的季节变化趋势研究

李玥瑶

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: 397778567@qq.com

收稿日期: 2020年11月2日; 录用日期: 2020年11月13日; 发布日期: 2020年11月20日

摘要

本文利用英国哈德莱气候预测研究中心提供的HadISST海表温度资料, 通过滑动平均, Theil-Sen无参趋势计算方法, 首先分析了热带大西洋海表温度的年平均, 季节平均及其季节变化趋势。然后再通过对热带大西洋东西海域分别进行区域平均, 分析其各自的时间序列和季节变化趋势, 最后对热带大西洋东西海温梯度的季节特征及长期趋势进行探究。研究结果表明: 1) 从纬向上看, 热带大西洋年平均海温总体由低纬向高纬递减; 从经向上看, 同纬度西部海域温度要高于东部海域。海温距平总体上由低纬向高纬递增, 由东至西递减; 春季和冬季, 在赤道及赤道以南以正距平为主, 赤道以北以负距平为主; 夏季和秋季的距平分布则刚好相反。2) 春季, 热带大西洋海温在赤道以南呈上升趋势, 赤道以北呈下降趋势; 秋季海温的南北趋势则刚好相反; 夏季, 海温在 $0^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 范围内呈上升趋势, 15°N 以北呈下降趋势, 赤道以南, 西岸呈上升趋势, 东岸呈下降趋势; 冬季, 海温总体呈下降趋势。3) 春季, 热带东大西洋海温呈上升趋势, 西大西洋呈下降趋势; 夏季和秋季, 热带东西大西洋海温均呈上升趋势; 冬季, 热带东西大西洋海温均呈下降趋势; 4) 春季和冬季, 热带西大西洋海温要低于东大西洋, 夏季和秋季则相反。春季和冬季, 海温梯度呈递减趋势, 夏季和秋季呈递增趋势。

关键词

热带大西洋, 海表温度, 海温梯度, 趋势计算

A Study on the Seasonal Variation Trend of the Tropical Atlantic SST Gradient

Yueyao Li

Academy of Atmospheric Sciences of Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: 397778567@qq.com

Received: Nov. 2nd, 2020; accepted: Nov. 13th, 2020; published: Nov. 20th, 2020

Abstract

In order to study the seasonal characteristics and trends of the SST gradient in the tropical Atlantic,

this paper uses the data of SST (HadISST) from the Hadley Center in the UK. Based on the method of moving average and Theil-Sen parameterless trend calculation, this paper first analyzes the annual average, seasonal average and seasonal trend of the SST in the tropical Atlantic. Then, the regional averages of the eastern and western tropical Atlantic are analyzed to research their respective time series and seasonal trends. At last, the seasonal characteristics of east-west SSTA gradients and long-term trends of the tropical Atlantic are analyzed. The research results show that: 1) From the latitude upward, the annual average SST in the tropical Atlantic generally shows a decreasing trend from low latitude to high latitude. From the perspective of the longitude, in the equatorial Atlantic Ocean, the SST in the western sea area is higher than that in the eastern sea area at the same latitude. SSTA generally increases from low latitudes to high latitudes, and decreases from east to west. In spring and winter, the SSTA in the tropical Atlantic is mainly positive near the equator and in the south of the equator, but negative in the north of the equator. Summer and autumn are just the opposite. 2) In spring, the SSTA in the tropical Atlantic increases yearly in the south of the equator, but opposite in the north of the equator, the north-south trend of the autumn SSTA is just the opposite. In summer, the SSTA shows an upward trend in the range of 0°N~15°N, the north of 15°N shows a downward trend, and the south of the equator, SSTA on the west coast is increasing, while on the east coast is decreasing. In winter, the SSTA in the equatorial Atlantic generally declines. 3) In spring, the SST is increasing in the tropical east Atlantic and decreasing in the tropical west Atlantic. In summer and autumn, the SSTA in the tropical east and west Atlantic Ocean both shows an increasing trend. In winter, the SSTA in the tropical east and west Atlantic Ocean shows a decreasing trend. 4) In spring and winter, the SSTA in the tropical western Atlantic is lower than in the eastern Atlantic, while the opposite is true in summer and autumn. The SSTA gradient in spring and winter decreases yearly, and in summer and autumn, it shows an increasing trend.

Keywords

Tropical Atlantic, Sea Surface Temperature, Sea Temperature Gradient, Trend Calculation

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

在早前的研究中我们可以看到,大西洋的海温变化对于东亚地区季风及降水过程都有着十分重要的影响。其对于东亚季风的影响表现在诸多方面,例如,大西洋海温增暖对夏季东亚大气环流及季风环流有着重要影响[1]。大西洋海温异常在 ENSO 影响印度-东亚夏季风中有重要作用,热带北大西洋夏季海温和前冬 Niño3 区海温具有显著正相关[2]。徐集云等[3]讨论了热带北大西洋海温异常对南海夏季风的影响及其机理,表明夏季 NTA 海温异常与 SCSSM 存在显著的负相关关系。此外,大西洋海温对于东亚地区降水的影响也十分显著,研究表明大西洋海表温度异常与中国东北地区的夏季降水有密切联系[4]。刘焕才等[5]发现青藏高原夏季降水存在南北反向变化的空间模态,这种变化模态与北大西洋涛动(NAO)密切相关。除了对东亚地区气候的影响,热带大西洋海温对北美降水变化的影响也十分显著[6],东南欧冬季降水变化与北大西洋海温也有密切的关系[7]。

针对大西洋海表温度的变化,早前的学者们做出了巨大的贡献。Allon G.Turek [8]对海表温度的分布规律进行了研究。Sarah L. Heidt [9]对比了许多不同类型的数据,分析了不同因素对海表温度变化的影响。孟庆佳等[10]对热带海洋海表面温度年际变化的特征做出阐述,表明 ENSO 信号是热带海洋年际变化的主要规律。Ryuichi Kawamura 等[11]阐述了热带西太平洋海表温度的季节内变化,且热带对流活动与其

具有相同时间尺度的耦合关系。马亚维等[12]对北大西洋海域的海表温度季节特征及整体变化趋势进行研究。P.H.Ahentton 和 W.Cai [13]根据全球海温距平变化研究了各模态周期震荡的特征。Frankignoul [14]等研究了大西洋海温异常对 NAO 的影响。

目前对大西洋海表温度及其季节变化特征的研究较为普遍，然而对于海温梯度的研究则相对较少，晏红明等[15]的分析表明赤道印度洋纬向海温梯度的变化及其对气候的影响比较复杂，与其所产生的大尺度物理背景场有直接关系。Zeng-Zhen Hu 等[16]探究了与热带大西洋 SST 经向梯度有关的物理过程。基于此本文将从大西洋海表温度入手，进一步研究热带大西洋东西海温梯度的季节变化特征。

2. 资料与方法

2.1. 资料概况

本文所选取的 SST 数据资料全部来自英国哈德莱中心的 HadISST 资料，该数据的主要变量为海表温度，时间范围为 1900 年 1 月至 2019 年 12 月，时间步长为每月一次，空间范围为 90°S~90°N, 0°E~359°E，空间分辨率为 1° × 1°，具有较高的时空分辨率和精度且缺测值较少。数据格式为 netCDF 格式。

2.2. 研究方法

2.2.1. 滑动平均法

滑动平均法以简单平均数法为基础，按照顺序增减数据以求取滑动平均值，来消除偶然变动因素，进而找出事物发展演变的一般趋势并做出预测。对选取 N 个非平稳数据，其一般表达式为：

$$f_k = y = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n y_k + 1 \quad k = n+1, n+2, \dots, N-n \quad (1)$$

2.2.2. Theil-Sen 无参趋势计算方法

$$T = \text{Median} = \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right), \forall j < i, 1 \leq j < i \leq N \quad (2)$$

Median 是中位数函数， N 表示样本数目，代表所有情况的集合，所得到的 T 即为任意两点间斜率的中位数，即 Theil-Sen 趋势。其是选择通过任意两点间所有线斜率的中值来稳定地拟合的方法。此方法的计算效率高，且对异常值相对不敏感，对于异方差和偏斜数据，与简单线性回归相比更具准确性。

2.2.3. Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 的检验法是一种非参数的检验方，其优点是样本不需要按照一定的规律分布，也可免受少数异常值的干扰。用包含 n 个样本量的时间序列 X ，构造秩序列：

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (3)$$

S_k 表示的是 i 时刻数值大于 j 时刻数值的个数累计合。若其时间序列独立且随机，可定义一统计量：

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$UF_1 = 0$, $\text{Var}(S_k)$, $E(S_k)$ 是累计数 S_k 的方差和均值，在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立且有相同连续分布时：

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad \text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (5)$$

UFi 是标准正态分布, 若给定显著性水平, 则可根据正态分布表查出是否存在较明显的变化趋势。

3. 热带大西洋海表温度年平均, 季节平均及季节变化趋势

3.1. 热带大西洋海表温度年平均

首先, 从大西洋海表温度的逐月平均入手, 得出海温的年平均分布图, 为了方便之后对于东西大西洋区域平均及海温梯度的研究, 取 $15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\text{W}\sim 20^{\circ}\text{W}$ 范围内海域定义为热带东大西洋, 取 $15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $25^{\circ}\text{W}\sim 45^{\circ}\text{W}$ 范围的海域定义为热带西大西洋, 并在图中用绿色框区域标明。

从图 1 中可以看到, 从纬向上看, 热带大西洋年平均海表温度整体呈现出至低纬向高纬递减的趋势, 有呈东西带状分布的等值线。从经向上看, 热带大西洋同纬度西部海域海温要明显高于东部海域。赤道附近东西海域的温度差约为 2°C , 且温差由低纬向高纬递增, 南北纬 20° 附近东西海域温度差可达 $6^{\circ}\text{C}\sim 9^{\circ}\text{C}$ 。

这里简单分析东西海域温差的成因, 热带大西洋在东南信风和东北信风的作用下, 东部海表的暖海水形成向西移动的赤道暖流, 不断补充到西大西洋使其海表温度升高, 而东大西洋因表层暖海水流失导致上翻流加强, 低层冷海水向上补充使其海表温度降低。因此大西洋东部的海表温度要高于西部。

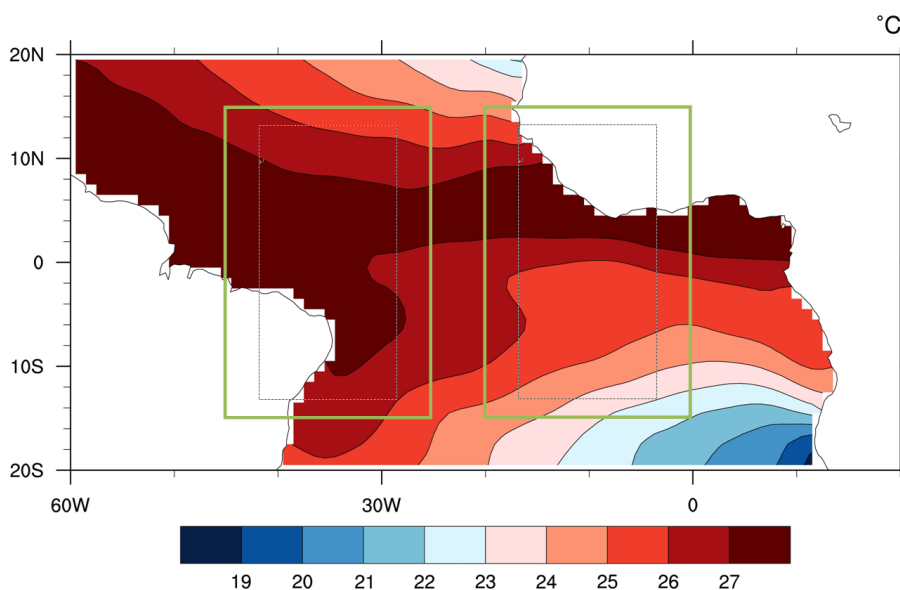


Figure 1. Annual average SST of the tropical Atlantic

图 1. 热带大西洋海表温度年平均

3.2. 热带大西洋海温距平的季节平均

为了进一步探究热带大西洋海温距平在各季节的分布特征, 分别求取海温距平的季节平均。这里用 3~5 月代表春季, 6~8 月代表夏季, 9~11 月代表秋季, 12 月及下一年的 1, 2 月代表冬季。从图 2 可看出, 春季和冬季海温距平总体分布较为相近, 夏季和秋季较为相近, 但海温距平的纬向梯度春冬要大于夏秋。

海温距平总体由低纬向高纬递增, 由东至西递减。春季和冬季, 热带大西洋海温在赤道及赤道以南为正距平, 赤道以北为负距平, 其中在 $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 大西洋东岸的海温负距平最明显, 在 $5^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 大西洋东岸的海温正距平最明显; 夏季和秋季, 正负距平的南北分布则刚好相反, 其中在 $10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 大西洋东岸的海温负距平最明显, 在 $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 大西洋东岸的海温正距平最明显; 四季海温距平最大可达 2.4°C 。

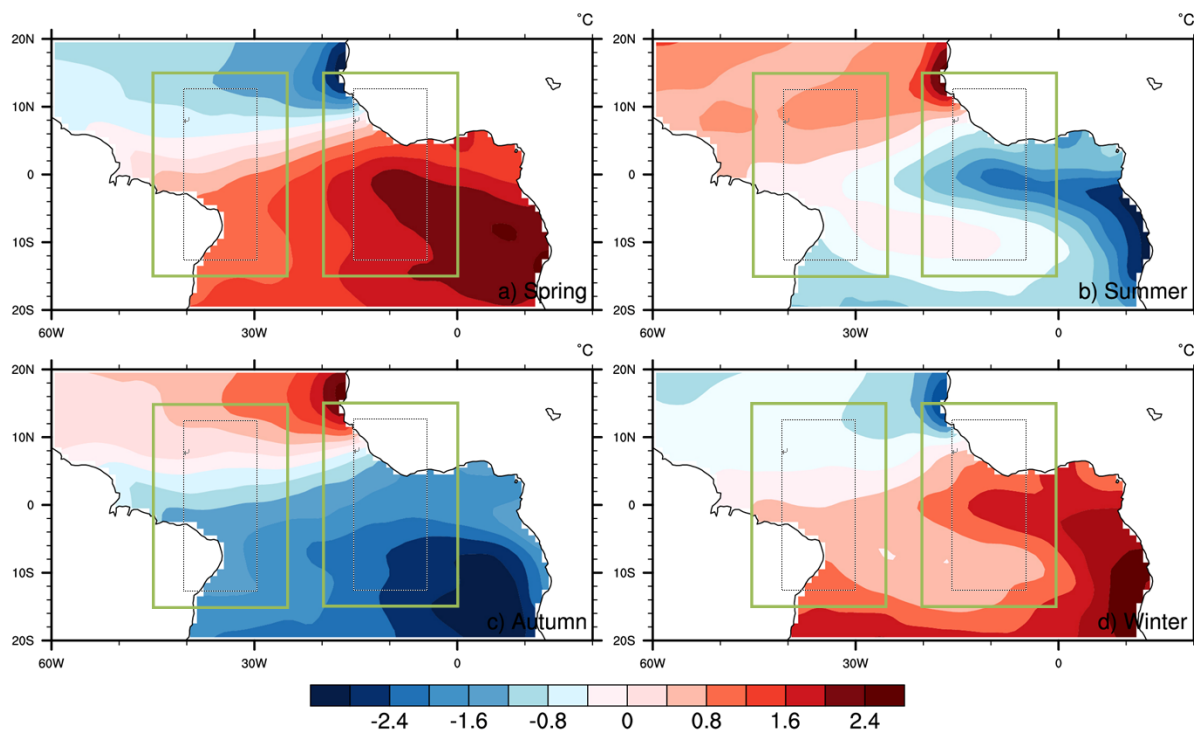
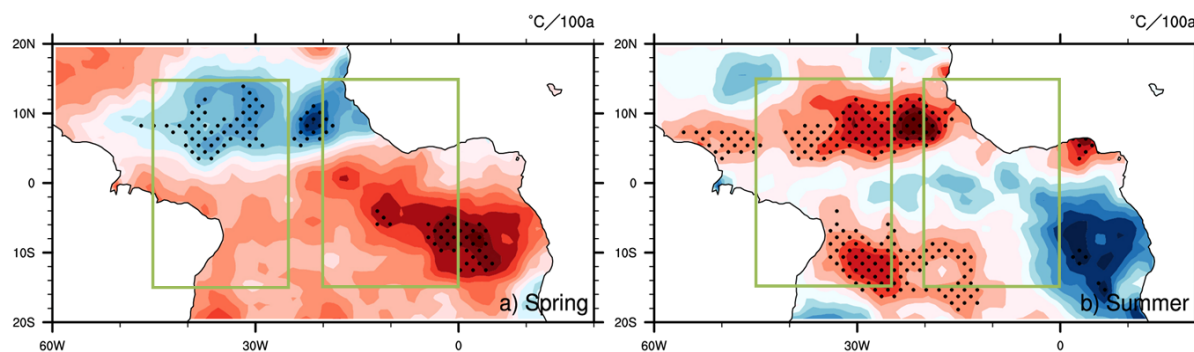


Figure 2. Seasonal average of SSTA in the tropical Atlantic
图 2. 热带大西洋海温距平的季节平均

3.3. 热带大西洋海温距平的季节变化趋势

在探究完热带大西洋海表温度的各季节特征后，着手分析其季节变化的趋势。图 3 为热带大西洋海温距平的季节变化趋势图，图中打点部分表示其趋势通过了 90% Mann-Kendall 显著性检验的区域。

由图中可看出，春季，热带大西洋海温在赤道以南呈上升趋势，赤道以北呈下降趋势，其中 5°S~15°S 大西洋东部的海温上升最明显，5°N~15°N 大西洋中部及东部的海温下降最明显；夏季，热带大西洋海温在 0°N~15°N 呈上升趋势，在 15°N 以北呈下降趋势。赤道以南，海温在大西洋西岸呈上升趋势，东岸呈下降趋势；秋季，热带大西洋海温在赤道以南呈下降趋势，赤道以北呈上升趋势，其中 10°S~15°S 的海温下降最明显，5°N~10°N 大西洋中部及东部的海温上升最明显；冬季，热带大西洋海温总体呈下降趋势，只有 5°S~20°S 大西洋东部的海温呈明显的上升趋势，其中 5°N~10°N 大西洋中部的海温下降最明显；四季海温上升(下降)趋势最大可达 0.24°C/100a (-0.32°C/100a)，且趋势绝对值高值区对应的趋势显著性也较高。



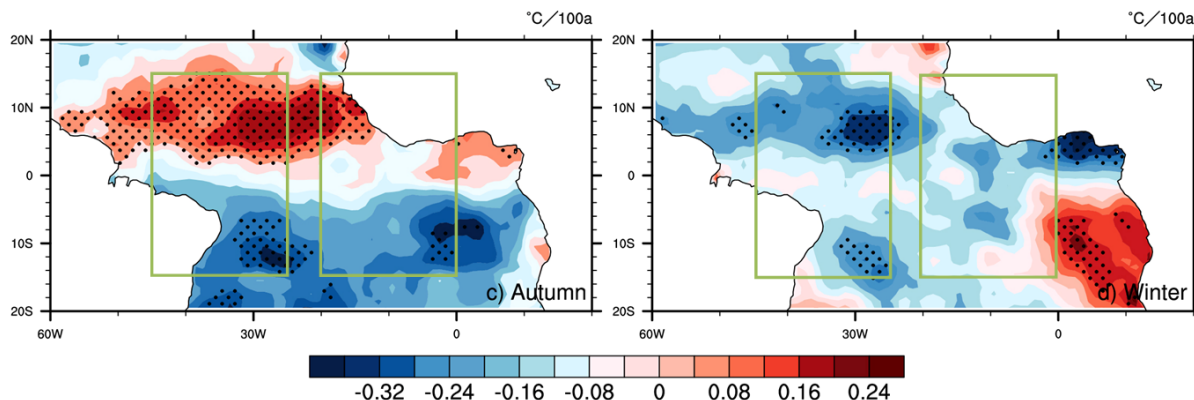


Figure 3. Seasonal trends of SSTA in the tropical Atlantic

图 3. 热带大西洋海温距平的季节变化趋势

4. 热带东西大西洋海温距平的区域平均和季节变化趋势

4.1. 热带东大西洋海温距平的区域平均和季节变化趋势

接下来对热带大西洋分东西区域分别研究其各自的季节平均及季节变化趋势，首先选取东大西洋海域进行区域平均，并对所得时间序列进行九年滑动平均。从图 4 中可看出，春季和冬季，热带东大西洋海温基本为正距平，正距平的极大值均出现在 1945 年前后；夏季和秋季，热带东大西洋海温均为负距平，负距平的极大值都出现在 1960 年前后；从图 5 中可看出，春季，夏季和秋季，热带东大西洋海温总体呈上升趋势，其中春季和夏季的上升趋势远大于秋季，分别约为 $0.048^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 、 $0.046^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 和 $0.015^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ；只有冬季，热带东大西洋海温总体呈下降趋势，约为 $-0.039^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 。

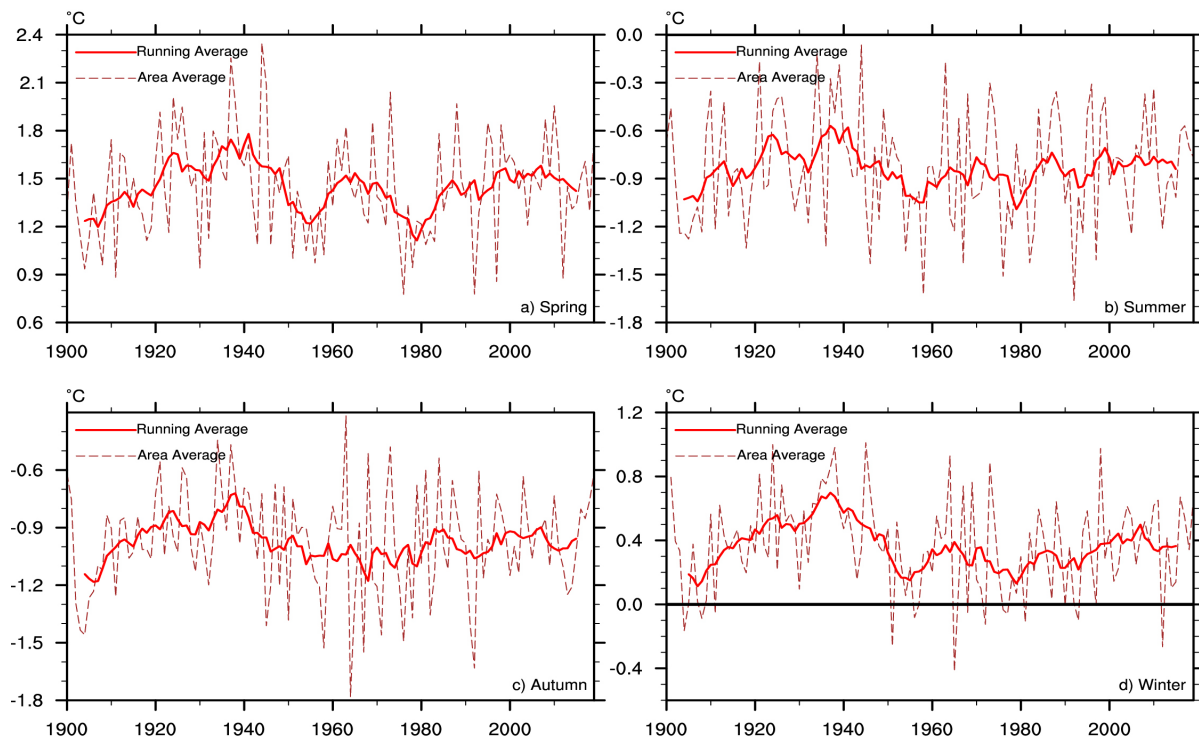


Figure 4. Regional average of SSTA in the tropical eastern Atlantic

图 4. 热带东大西洋海温距平的区域平均

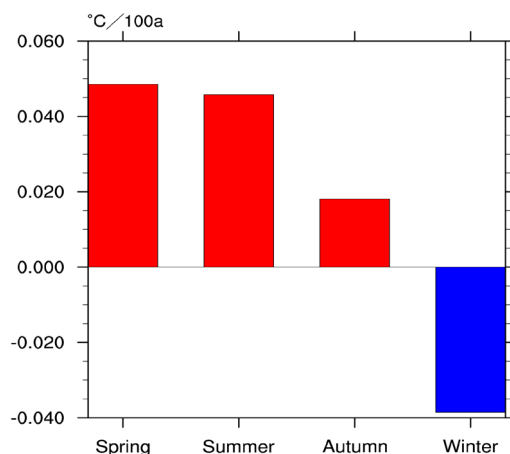


Figure 5. Seasonal trend of SSTA in the tropical eastern Atlantic

图 5. 热带东大西洋海温距平的季节变化趋势

4.2. 热带西大西洋海温距平的区域平均和季节变化趋势

然后再选取西大西洋海域进行区域平均求取其时间序列。总体上看，热带西大西洋海温的季节变化趋势要小于东大西洋。从图 6 可以看出，春季，热带西大西洋海温基本为正距平，只有在 1970~1990 年间出现了相对连续的负距平，海温正距平的极大值出现在 2008 年前后；夏季，热带西大西洋海温围绕 0 度线反复震荡，正负距平均有出现；秋季，热带西大西洋海温基本为正距平，海温正距平的极大值出现在 1938 年前后；冬季，热带西大西洋海温基本为负距平，海温负距平的极大值出现在 1993 年前后；从图 7 可以看出，夏季和秋季，热带西大西洋海温总体呈上升趋势，分别约为 $0.12^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 和 $0.08^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ；春季和冬季，热带西大西洋海温总体呈下降趋势，分别约为 $-0.07^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 和 $-0.085^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 。

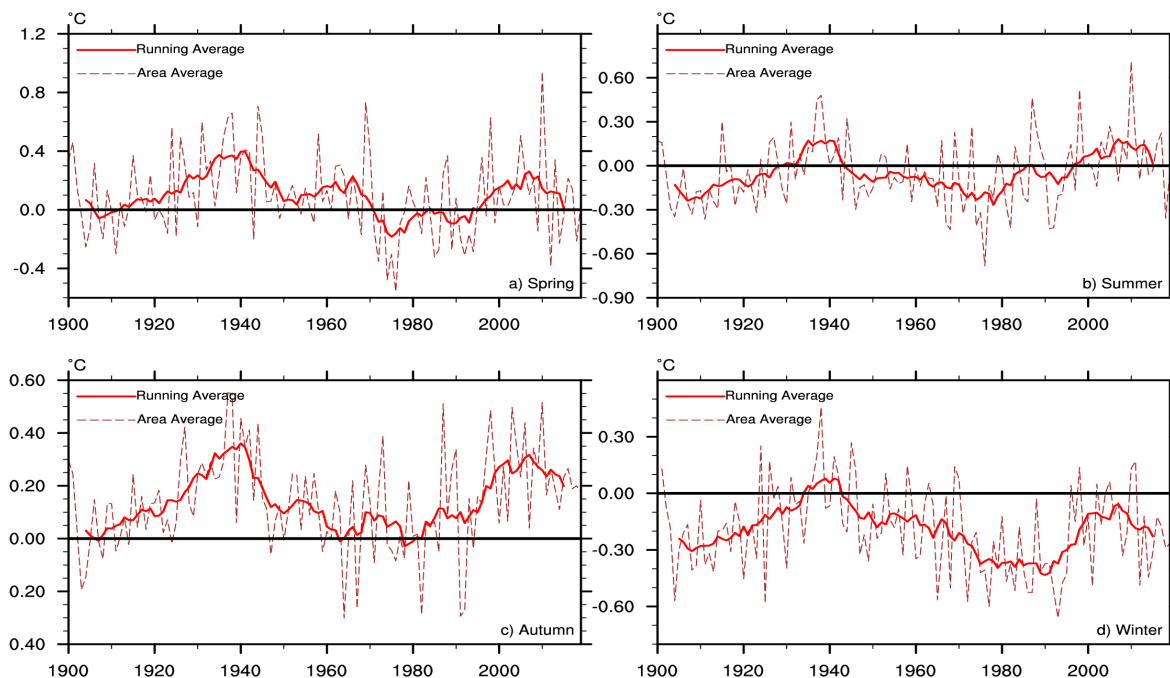


Figure 6. Regional average of SSTA in the tropical western Atlantic

图 6. 热带西大西洋海温距平的区域平均

5. 热带东西大西洋海温距平的区域平均和季节变化趋势

最后, 根据热带东西大西洋的区域平均求取东西海温梯度及其季节变化趋势, 从图 8 可以看出, 春季和冬季, 热带大西洋海温梯度整体为负值, 即西大西洋海温要低于东大西洋; 夏季和秋季, 热带大西洋海温梯度整体为正值, 即西大西洋海温要高于东大西洋; 从图 9 可以看出, 在春季和冬季, 热带大西洋东西海温梯度总体都呈递减趋势, 其中春季海温梯度的递减趋势远大于冬季, 其趋势值分别约为 $-0.115^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 和 $-0.042^{\circ}\text{C}/100\text{a}$; 在夏季和秋季, 热带大西洋东西海温梯度总体都呈递增趋势, 其趋势值分别约为 $0.052^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 和 $0.10^{\circ}\text{C}/100\text{a}$;

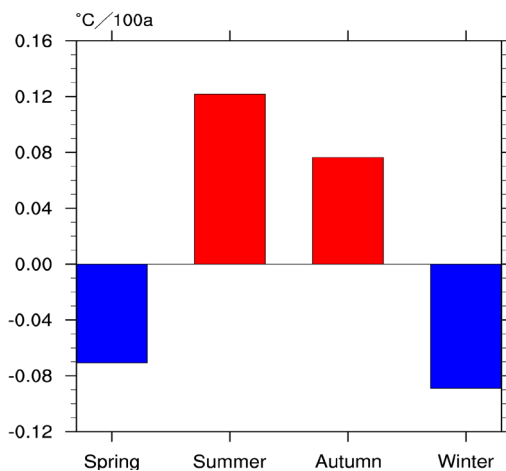


Figure 7. Seasonal trend of SSTA in the tropical western Atlantic

图 7. 热带西大西洋海温距平的季节变化趋势

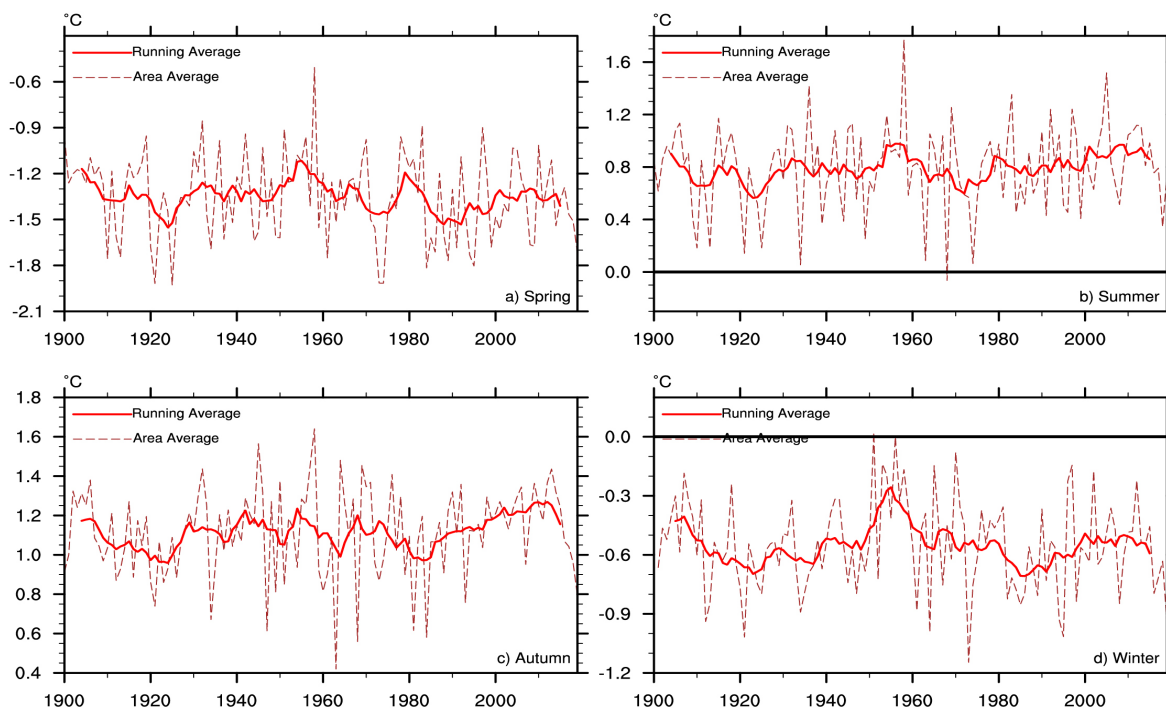


Figure 8. East-west SST gradient in the tropical Atlantic

图 8. 热带大西洋东西海温梯度

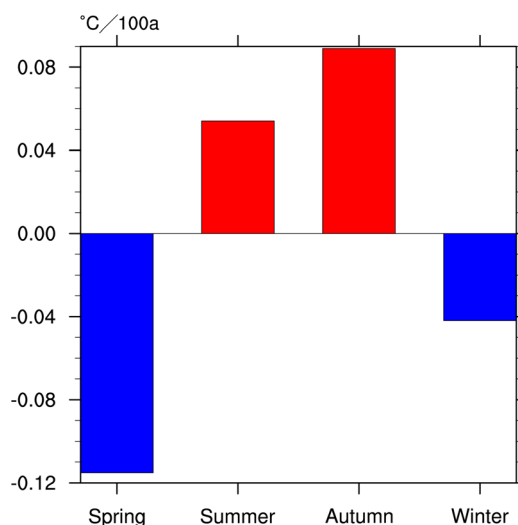


Figure 9. Seasonal trend of east-west SST gradient in the tropical Atlantic

图 9. 热带大西洋东西海温梯度的季节变化趋势

6. 结论

结合本文所分析的热带大西洋海温距平的年平均，季节平均，季节变化趋势，热带东西大西洋海温距平区域平均变化趋势及热带大西洋东西海温梯度及其季节变化趋势，得出结论如下：

1) 从纬向上看，热带大西洋年平均海温总体由低纬向高纬递减；从经向上看，同纬度西部海域温度要高于东部海域；

2) 热带大西洋海温距平总体上由低纬向高纬递增，由东至西递减；春季和冬季，在赤道及赤道以南以正距平为主，赤道以北以负距平为主；夏季和秋季的距平分布则刚好相反；

3) 春季，热带大西洋海温在赤道以南呈上升趋势，赤道以北呈下降趋势；秋季海温的南北趋势则刚好相反；夏季，海温在 $0^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 范围内呈上升趋势， 15°N 以北呈下降趋势。赤道以南，西岸呈上升趋势，东岸呈下降趋势；冬季，海温总体呈下降趋势；

4) 春季，热带东大西洋海温呈上升趋势，西大西洋呈下降趋势；夏季和秋季，热带东西大西洋海温均呈上升趋势；冬季，热带东西大西洋海温均呈下降趋势；

5) 春季和冬季，热带西大西洋海温要低于东大西洋，夏季和秋季则相反。春季和冬季，海温梯度呈递减趋势。夏季和秋季呈递增趋势。

致 谢

感谢母校成都信息工程大学的培养。

参考文献

- [1] 杨修群, 谢倩, 黄士松. 大西洋海温异常对东亚夏季大气环流影响的数值试验[J]. 气象学报, 1992, 50(3): 349-354.
- [2] 容新尧, 张人禾, Li Tim. 大西洋海温异常在 ENSO 影响印度-东亚夏季风中的作用[J]. 科学报, 2010, 55(14): 1397-1408.
- [3] 徐集云, 霍利微, 宋超辉, 等. 热带北大西洋海温异常对南海夏季风的影响及其机理[J]. 大气科学报, 2019, 42(2): 293-302.

-
- [4] 白人海. 大西洋海表温度异常与中国东北地区夏季降水的关系[J]. 海洋通报, 2001, 20(1): 23-29.
- [5] 刘焕才, 段克勤. 北大西洋涛动对青藏高原夏季降水的影响[J]. 冰川冻, 2012, 34(2): 311-318.
- [6] Kushnir, Yochanan, Seager, *et al.* (2010) Mechanisms of Tropical Atlantic SST Influence on North American Precipitation Variability. *Journal of Climate*, **23**, 5610-5628. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3172.1>
- [7] Hatzaki, M. and Wu, R.G. (2015) The South-Eastern Europe Winter Precipitation Variability in Relation to the North Atlantic SST. *Atmospheric Research*, **152**, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.008>
- [8] Turek, A.G. (2008) Smart Climatology Applications for Undersea Warfare. Naval Postgraduate School, Monterey.
- [9] Heidt, S.L. (2009) Long Range Atmosphere-Ocean Forecasting in Support of USW Operations in the Western North Pacific. Naval Postgraduate School, Monterey.
- [10] 孟庆佳, 林鹏飞, 唐晓晖. 20 世纪热带海洋海表面温度年际变化的特征[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 59-65.
- [11] Ryuichi Kawamura, 陈贤. 热带西太平洋海表温度的季节内变化[J]. 湖北气象, 1992, 11(2): 25-28.
- [12] 马亚维, 郑崇伟, 丛爱丽, 等. 近百余年来北大西洋海表温度的季节特征及变化趋势[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(26): 10723-10725.
- [13] Cai, W. and Whetton, P.H. (2001) Modes of SST Variability and the Fluctuation of Global Mean Temperature. *Climate Dynamics*, **17**, 889-901. <https://doi.org/10.1007/s003820100152>
- [14] Frankignoul, Claude, Kestenare, *et al.* (2005) Observed Atlantic SST Anomaly Impact on the NAO: An Update. *Journal of Climate*, **18**, 4089-4094. <https://doi.org/10.1175/JCLI3523.1>
- [15] 晏红明, 李崇银. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响[J]. 大气科学, 2007, 31(1): 1961-1978.
- [16] Hu, Z.-Z. and Huang, B.H. (2006) Physical Processes Associated with the Tropical Atlantic SST Meridional Gradient. *Journal of Climate*, **19**, 5500-5518. <https://doi.org/10.1175/JCLI3923.1>