

## 热带北大西洋海温与降水关系的季节性特征及其物理机制

徐蓉蓉 张文君 胡苏琼

### Seasonality of the SST-precipitation relationship over the tropical North Atlantic and possible mechanisms

XU Rongrong, ZHANG Wenjun, HU Suqiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240113>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 北大西洋和热带印度洋海温的协同作用对松花江流域暖季降水年代际变化的影响

Joint effects of the sea surface temperatures over North Atlantic and the tropical Indian Ocean on the interdecadal variation of warm-season precipitation in the Songhua river basin

气象学报. 2023, 81(2): 258–268 doi: [10.11676/qxxb2023.20220068](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220068)

#### 卫星遥感北大西洋风暴“尤尼斯”生成和发展特征

Formation and development of North Atlantic Storm Eunice revealed by satellite remote sensing

气象学报. 2024, 82(1): 80–94 doi: [10.11676/qxxb2024.20230006](https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20230006)

#### 基于弱耦合资料同化的冬季北大西洋涛动年际变率预测

Improved interannual predictability of winter North Atlantic Oscillation with a weakly coupled data assimilation scheme

气象学报. 2023, 81(1): 124–136 doi: [10.11676/qxxb2023.20220062](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220062)

#### 北大西洋多年代际振荡（AMO）对南海夏季风撤退年代际变率的影响及可能机理

Impacts of AMO on the interdecadal variability of South China Sea summer monsoon withdrawal and associated mechanisms

气象学报. 2022, 80(5): 668–684 doi: [10.11676/qxxb2022.050](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.050)

#### 2018年1月北大西洋上一个具有“T”型锋面结构的超强爆发性气旋的分析

Analysis of a super explosive cyclone with frontal "T-bone" structure over the Northern Atlantic in January 2018

气象学报. 2021, 79(3): 387–399 doi: [10.11676/qxxb2021.025](https://doi.org/10.11676/qxxb2021.025)

#### 华北—东北地区南部汛期降水影响因子分析及季节预报模型的建立

Screening of predictors and development of a statistical prediction model for flood-season precipitation in North—southern Northeast China

气象学报. 2023, 81(5): 741–763 doi: [10.11676/qxxb2023.20220178](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220178)



扫码关注公众号，获取更多信息！

# 热带北大西洋海温与降水关系的季节性特征及其物理机制\*

徐蓉蓉 张文君 胡苏琼  
XU Rongrong ZHANG Wenjun HU Suqiong

南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044

State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2024-09-02 收稿, 2025-06-24 改回.

徐蓉蓉, 张文君, 胡苏琼. 2025. 热带北大西洋海温与降水关系的季节性特征及其物理机制. 气象学报, 83(5): 1217-1228

**Xu Rongrong, Zhang Wenjun, Hu Suqiong. 2025. Seasonality of the SST-precipitation relationship over the tropical North Atlantic and possible mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(5):1217-1228**

**Abstract** Based on the monthly Sea Surface Temperature (SST) data from the Met Office Hadley Centre, the Global Precipitation Climatology Project monthly precipitation data, and the historical simulations from Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) climate models, the present work investigates the seasonality of the SST-precipitation relationship over the tropical North Atlantic and possible role of ENSO (El Niño-Southern Oscillation). It is found that the relationship of SST anomalies in the tropical North Atlantic with local precipitation exhibits a remarkable seasonality. During spring and summer, there is a significant positive correlation between SST and precipitation in this region, indicating a strong local ocean-atmosphere coupling. In contrast, in autumn and winter, the ocean-atmosphere coupling weakens significantly, and almost no significant precipitation response to SST is detected. Further analysis reveals that this seasonality is mainly associated with the seasonal cycle of the background SST and local SST variability in the tropical North Atlantic. Despite cooler background SST in spring, the strong SST variability during this season makes SST easy to exceed the convection threshold and thus induces precipitation anomalies. In summer, the warm background SST favors the enhanced local ocean-atmosphere coupling. The relatively weak SST variability in autumn weakens the local precipitation response, despite a relatively warm SST background. The cooler background SST in winter results in a weak ocean-atmosphere coupling. ENSO has a significant influence on spring SST and precipitation anomalies in the tropical North Atlantic. As a result, the strong local SST anomalies in spring are more likely to actively trigger local convective responses under ENSO forcing. However, in other seasons, the impact of ENSO on SST anomaly in the tropical North Atlantic is relatively small, and thus there is almost no difference in local ocean-atmosphere coupling in the tropical North Atlantic with or without ENSO SST forcing. These findings emphasize the critical role of spring and summer tropical North Atlantic SST anomalies in local convection and associated climate impacts, which is important for short-term climate prediction related to the tropical North Atlantic SST.

**Key words** Tropical North Atlantic, SST, Precipitation, Seasonality, ENSO

**摘要** 基于英国哈得来中心提供的逐月海表温度资料、美国全球降水气候中心提供的逐月降水资料以及 CMIP6 历史模拟资料, 探究了热带北大西洋海温异常与局地降水异常关系的季节性特征及其在有无 ENSO 海温强迫下的差异, 并分析了可能的物

\* 资助课题: 国家自然科学基金项目(42125501)。

作者简介: 徐蓉蓉, 主要从事海-气相互作用研究。E-mail: rongxu@163.com

通信作者: 张文君, 主要从事 ENSO 机理及海-气相互作用等的研究。E-mail: zhangwj@nuist.edu.cn

理机制。结果表明,热带北大西洋海温异常和局地降水异常的关系呈现出明显的季节性差异。春、夏季,该区域海温与降水呈显著正相关,局地海-气耦合强;相对而言,秋、冬季海-气耦合弱,局地降水对海温异常几乎没有响应。进一步研究表明,这种季节性变化特征主要是由热带北大西洋气候态海温及局地海温变率的季节循环导致。春季热带北大西洋气候态海温偏低,但该季的强海温变率使海温可突破对流阈值引发降水异常;夏季偏高的气候态海温使得该区域海-气耦合活跃;尽管秋季气候态海温也偏高,但是较小的海温变率使得局地降水响应减弱,易受外界噪声干扰;冬季偏低的气候态海温导致该区域海-气耦合较弱。由于 ENSO 对春季热带北大西洋海温异常的显著影响,春季该区域在 ENSO 强迫下的局地海温异常更容易激发局地对流;而在其他季节,该区域海-气耦合程度受 ENSO 的影响较小。本研究的结果强调了春、夏季热带北大西洋海温异常对激发热带强对流和引起远距离气候影响的重要作用,这对短期气候预测具有重要意义。

关键词 热带北大西洋, 海温, 降水, 季节性, ENSO

中图法分类号 P461

## 1 引言

热带北大西洋的海表温度在全球天气和气候系统中发挥着重要作用,其异常不仅能对局地的天气、气候产生影响,还可通过大气遥相关影响全球的气候变率(Saravanan, et al, 2000; Marshall, et al, 2001; Pezzi, et al, 2001; Chang, et al, 2006; Vimont, et al, 2007; Kushnir, et al, 2010; Yoon, et al, 2010; Hastenrath, 2012; Murakami, et al, 2018; 徐集云等, 2019)。早期的研究(Hastenrath, et al, 1977; Markham, et al, 1977)已表明,热带北大西洋区域的海温异常与巴西东北部和西非地区的降水存在显著的相关,偏高的热带北大西洋海温异常通常会导致巴西东北部出现异常干旱,而西非地区易发生洪涝;相反,偏低的海温则会导致巴西东北部降水增多、西非地区降水减少。热带北大西洋区域的海温异常还与北大西洋上的飓风活动存在显著的正相关,即当夏、秋季热带北大西洋海温升高时,北大西洋飓风的数量及其登陆美国东南部地区的频率会显著上升,反之则会下降(Gray, 1984; Xie, et al, 2005; Wang, et al, 2006; Kossin, et al, 2007; Vimont, et al, 2007; 赵晓彤等, 2020; Saunders, et al, 2020; Jones, et al, 2022)。进一步研究(Watanabe, et al, 1999; Robertson, et al, 2000; Brönnimann, 2007; Sung, et al, 2013; Yang, et al, 2018; 李忠贤等, 2019; Zhang, et al, 2019, 2023; Wang, et al, 2022; Gozdz, et al, 2024)表明,热带北大西洋海温异常还可通过调控北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)对热带太平洋的厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的响应进而对欧亚地区的天气和气候产生影响。以往的大量研究都已表明热带海温异常对遥远地区天气、

气候的影响主要是通过激发对流进而引起大气遥相关实现的,因此,深入探究热带北大西洋局地海温异常与降水的关系对于理解其相关的天气、气候影响具有重要的科学意义。

热带北大西洋地区的海温和对流活动随太阳辐射的年循环表现出明显的季节变化。春季太阳直射点主要在赤道上,随后逐渐向北移动;相应地,热带大西洋的暖池和赤道辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)也会随之北移,并且滞后于太阳辐射年循环约四分之一周期(Mitchell, et al, 1992; Philander, et al, 1996; Li, et al, 1997; Gu, et al, 2006; 王懿彬等, 2022)。大量研究(Graham, et al, 1987; Lau, et al, 1997; Johnson, et al, 2010; Ren, et al, 2021; Williams, et al, 2023)发现,热带海温和对流系统存在非线性关系,只有当海温达到一定的阈值时才能引发对流;也就是说当背景态海温较低时,即使存在海温异常,也不足以激发对流。因此,热带北大西洋地区气候态海温的季节循环很有可能导致其局地海温异常与对流的关系在不同季节表现出显著差异。例如, Jiang L S 等(2022)指出,尽管从北半球的春季到夏季热带北大西洋海温变率的强度在减弱,但是其激发的局地对流却在显著增强,他们认为这主要与热带大西洋暖池和赤道辐合带的向北移动有关。因此,考虑到热带北大西洋背景态海温季节循环的可能调制作用,在探究热带北大西洋局地海温与降水关系时,有必要将四季分开进行研究。

作为热带太平洋最显著的年际变率信号, ENSO 能够通过大气遥相关在热带北大西洋区域引起显著的海温异常(Covey, et al, 1978; Nobre, et al, 1996; Enfield, et al, 1997; Chiang, et al, 2002; Huang, 2004; Xie, et al, 2004; 郑建等, 2010;

Amaya, et al, 2014; Taschetto, et al, 2016; García-Serrano, et al, 2017; Yang, et al, 2018; Yin, et al, 2019)。在 ENSO 衰减年的春季, 热带北大西洋区域可以观测到显著的海温异常, 通常在厄尔尼诺衰减年春季热带北大西洋海温异常偏高, 而在拉尼娜衰减年春季热带北大西洋海温则显著偏低。ENSO 主要通过引起热带北大西洋上信风强度变化, 进而影响局地潜热通量变化导致热带北大西洋区域的海温异常 (Carton, et al, 1996; Enfield, et al, 1997; Saravanan, et al, 2000)。有关专家提出两种主要机制以理解热带北大西洋上信风异常的确切起源, 一种即直接通过热带沃克环流的调整, 另一种则与热带外的太平洋-北美 (Pacific North American, PNA) 遥相关有关 (Hoskins, et al, 1981; Wallace, et al, 1981; Enfield, et al, 1997; Sasaki, et al, 2015; Hu, et al, 2023)。除此之外, ENSO 也对热带大西洋区域的降水分布有重要的调制作用 (Enfield, et al, 1999; Dai, et al, 2000; Jiang F, et al, 2021)。Jiang F 等 (2021) 研究表明, 从 ENSO 发展年的夏季至其衰减年的春季, 热带大西洋降水对 ENSO 的响应显著, 并且随着大西洋 ITCZ 的季节性移动, 这种影响也呈现出经向移动的特征。因此, 考虑到 ENSO 对热带北大西洋局地海温和降水的影响, 自然而然地提出了一个问题: 在 ENSO 海温强迫下, 热带北大西洋局地海温与降水的关系是否会发生显著变化?

尽管大量研究揭示了热带北大西洋海温异常对全球天气和气候变率的影响, 但关于其局地海温与降水关系的研究仍然较为有限, 这涉及到该区域海温异常对局地和远程气候影响重要性的问题。鉴于热带北大西洋背景态海温明显的季节循环, 局地海温与降水关系的季节性差异亟待研究。进一步, 在 ENSO 强迫的作用下, 海温与降水的耦合关系是否会发生变化也值得探讨。因此, 本研究旨在通过分析热带北大西洋局地海温与降水关系的季节差异, 并探讨 ENSO 海温强迫在其中的可能作用, 为理解和预测热带北大西洋海温异常相关的天气和气候影响提供科学依据。

## 2 资料和方法

使用的资料包括: (1) 英国哈得来中心提供的逐月平均海表温度资料 (HadISST1.1), 数据水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  (Rayner, et al, 2003); (2) 美国全球降

水气候中心 (GPCC) 提供的全球降水资料; 文中取研究时段 1979—2023 年。为了验证观测中北大西洋局地海温与降水的关系, 文中也使用了参与国际耦合模式比较计划第 6 阶段 (CMIP6) 的 35 个气候模式历史模拟试验提供的海温与降水资料 (表 1)。由于不同模式提供的集合数量不同, 文中只分析每个模式的第一个成员 (即 r1i1p1f1 试验)。考虑到各模式空间分辨率存在差异, 文中通过双线性插值法将 CMIP6 数据先插值到  $1^\circ \times 1^\circ$  的格点上再进行统计分析。由于 CMIP6 历史模拟只提供至 2014 年, 为保证与观测一样的资料长度, 使用 1969—2014 年资料进行分析。

Nino3.4 指数被定义为 ( $5^\circ\text{N}—5^\circ\text{S}$ ,  $170^\circ—120^\circ\text{W}$ ) 区域平均海表温度异常。热带北大西洋海表温度异常指数 (NTA) 被定义为 ( $5^\circ—25^\circ\text{N}$ ,  $75^\circ—15^\circ\text{W}$ ) 的区域平均海表温度异常。为了分析与 ENSO 相关的热带太平洋海温强迫在热带北大西洋局地海表温度异常与降水关系季节性差异中的作用, 针对每个季节进行分类。对于每个季节, 当同期 Nino3.4 指数的绝对值不小于 0.5 时记为有 ENSO 海温强迫, 小于 0.5 时则记为无 ENSO 海温强迫, 具体年份见表 2。此外, 为避免全球变暖可能

表 1 文中使用的 35 个 CMIP6 气候模式  
Table 1 35 CMIP6 climate models utilized in this study

模式名	所属国家和地区	模式名	所属国家和地区
ACCESS-CM2	澳大利亚	GISS-E2-1-G	美国
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	GISS-E2-1-H	美国
BCC-CSM2-MR	中国	GISS-E2-2-G	美国
BCC-ESM1	中国	GISS-E2-2-H	美国
CAMS-CSM1-0	中国	IPSL-CM6A-LR	法国
CanESM5	加拿大	IPSL-CM6A-LR-INCA	法国
CAS-ESM2-0	中国	MCM-UA-1-0	美国
CESM2	美国	MIROC6	日本
CESM2-WACCM-FV2	美国	MPI-ESM-1-2-HAM	德国
CMCC-CM2-HR4	加拿大	MPI-ESM1-2-HR	德国
EC-Earth3-CC	欧盟	MPI-ESM1-2-LR	德国
FGOALS-f3-L	中国	MRI-ESM2-0	日本
FIO-ESM-2-0	中国	NESM3	中国
E3SM-1-0	美国	NorESM2-LM	挪威
E3SM-1-1-ECA	美国	NorESM2-MM	挪威
E3SM-1-1	美国	SAM0-UNICON	韩国
GFDL-CM4	美国	TaiESM1	中国台湾
GFDL-ESM4	美国		

表2 各季节有无 ENSO 强迫事件选取

Table 2 Events with or without influence of ENSO in the four seasons

	有 ENSO 影响年	无 ENSO 影响年
春季	1983、1984、1985、1986、1987、1989、1992、1996、1998、1999、2000、2006、2008、2009、2010、2011、2016、2018、2019	1979、1980、1981、1982、1988、1990、1991、1993、1994、1995、1997、2001、2002、2003、2004、2005、2007、2012、2013、2014、2015、2017、2020
夏季	1982、1983、1984、1985、1987、1988、1989、1991、1993、1997、1999、2000、2002、2010、2015、2019	1979、1980、1981、1986、1990、1992、1994、1995、1996、1998、2001、2003、2004、2005、2006、2007、2008、2009、2011、2012、2013、2014、2016、2017、2018、2020
秋季	1982、1983、1985、1986、1987、1988、1995、1997、1998、1999、2002、2004、2006、2007、2009、2010、2011、2015、2017、2020	1979、1980、1981、1984、1989、1990、1991、1992、1993、1994、1996、2000、2001、2003、2005、2008、2012、2013、2014、2016、2018、2019
冬季	1979、1982、1983、1984、1986、1987、1988、1991、1994、1995、1997、1998、1999、2000、2001、2002、2004、2005、2006、2007、2008、2009、2010、2011、2014、2015、2016、2017、2018、2020	1980、1981、1985、1989、1990、1992、1993、1996、2003、2012、2013、2019

的影响,对所有的资料进行了去趋势处理;采用了相关分析、合成分析、一元线性回归等常用的气象诊断分析方法,利用双边  $t$  检验对统计结果进行显著性检验。

### 3 热带北大西洋海温异常与局地降水异常关系的季节性差异

图 1 给出了 4 个季节 NTA 分别回归的同期海表温度和降水异常的空间分布。可以看到,NTA 总是对应着全区正海温异常(反之,NTA 的负值将对应负海温异常),这表明 NTA 可以描述热带北大西

洋局地海温异常的整体年际变化特征。此外,海温异常的空间分布和强度表现出一定的季节差异,冬、春季(文中定义春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月、秋季为 9—11 月、冬季为 12 月—次年 2 月)较强,而夏、秋季较弱,并且最强的海温异常中心位于东侧,这可能与该区域较浅的温跃层和海水的上翻运动有关。然而,NTA 与局地降水异常的关系在不同季节存在明显的差异。具体地,春季,显著的降水正异常出现在热带北大西洋上的大部分区域,这表明热带北大西洋局地正海温异常可以激发正的降水异常,反之,低海温则会导致局地降水减少(图 1a)。

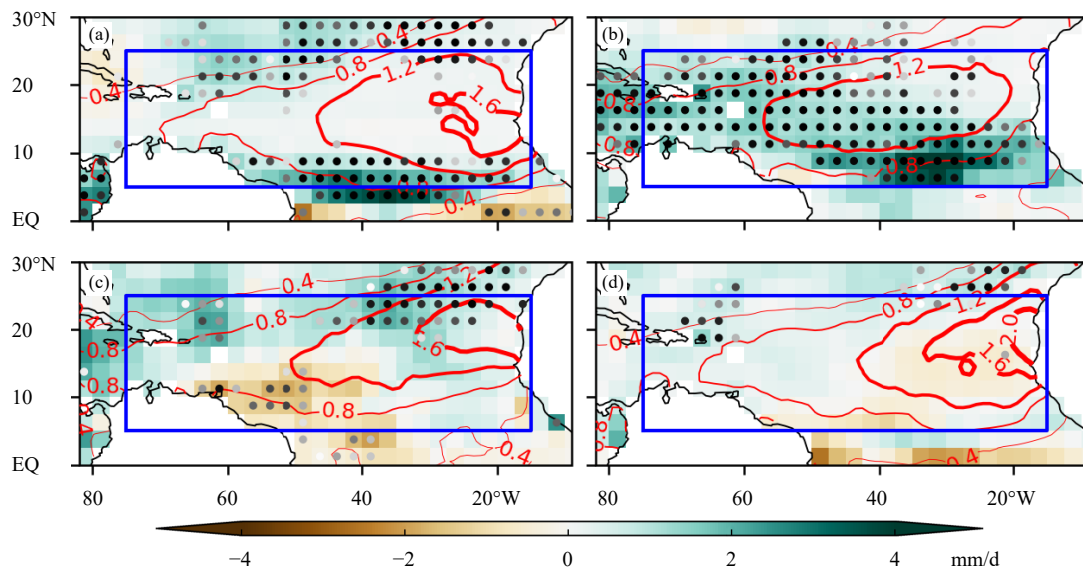


图 1 1979—2023 年 NTA 分别回归的同期降水异常(色阶)和海表温度异常(等值线,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季;打点表示通过 95% 信度检验的降水异常,颜色深度表示显著性强度,蓝色框是研究的热带北大西洋区域)

Fig. 1 Regressed simultaneous precipitation (shaded) and SST (contour, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) anomalies upon (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter NTA index during 1979—2023 (dots represent precipitation anomalies above the 95% confidence level; the blue box denotes the tropical North Atlantic region)

夏季 NTA 与局地降水异常的耦合关系相对于春季明显增强,如图 1b 所示,该区域的正海温异常对应着更强的降水正异常,这表明夏季 NTA 具有更强的影响局地 and 远程气候异常的潜力。这与之前的研究一致,夏季 NTA 容易激发对流引起大气遥相关,从而影响全球的天气、气候(Hong, et al, 2014; 霍利微等, 2016; Jiang L S, et al, 2021, 2022)。相比之下,秋季 NTA 与局地降水异常的耦合关系明显较弱,具体地,在热带北大西洋的南部地区几乎不存在显著的降水异常,显著的降水正异常主要位于其北部地区(图 1c)。冬季,总体上类似于秋季,且北部地区海温与降水的耦合关系进一步减弱。也就是说,秋、冬季热带北大西洋的海温异常对局地对流及其相关气候影响中的作用明显下降。

已有研究(Jiang F, et al, 2021, 2022; Zhang, et al, 2021)指出,ENSO 对热带北大西洋的海温和降水异常存在明显的影响。那么上述海-气耦合关系是否会受到 ENSO 海温强迫的影响呢?为了探究这一问题,进一步检查了有无 ENSO 海温强迫的热带北大西洋局地海温与降水的耦合关系(图 2 和 3)。如图 2 所示,在无 ENSO 海温强迫下,春、夏季 NTA 与局地降水异常依旧存在正相关(图 2a、b),而秋、冬季不存在显著相关(图 2c、d),这与前文结论一致。在有 ENSO 海温强迫的情况下,春季该区域海温异常与局地对流的相关(图 3a)强于无

ENSO 海温强迫的情况(图 2a),夏季略有减弱(图 3b),秋、冬季依然不存在显著相关(图 3c、d)。为了进一步验证上述结论,图 4 给出了热带北大西洋区域平均的海温与降水异常在各季节的相关系数及其在有、无 ENSO 海温强迫下的差异。对于春、夏季,该区域海温与降水具有强耦合关系,所有年相关系数为 0.59 和 0.77,在有 ENSO 海温强迫下的相关系数分别为 0.71 和 0.74,在无 ENSO 海温强迫下分别为 0.49 和 0.79,相关系数都通过了 95% 信度检验。对比之下,秋、冬季海-气耦合很弱,所有年相关系数为 0.2 或 0,有 ENSO 海温强迫下的相关系数分别为 0.08 和 -0.02,无 ENSO 海温强迫下分别为 0.27 和 0.13,相关系数都没有通过 95% 信度检验。

#### 4 热带北大西洋海温异常与局地降水异常关系季节差异的可能机制

为了探究 NTA 与局地降水异常关系季节差异的可能机制,首先检查了热带北大西洋气候态海温与降水在各季节的空间分布(图 5)。Jiang F 等(2021)发现大西洋 ITCZ 具有明显的南北不对称,表现为窄带状的强降水,信风在此交汇(见该文献附图 S1a)。一般而言,ITCZ 位于热带海洋并延伸到陆地,而陆地上的 ITCZ 往往是不规则的,并且与海洋上的 ITCZ 分离(Mitchell, et al, 1992; Philander,

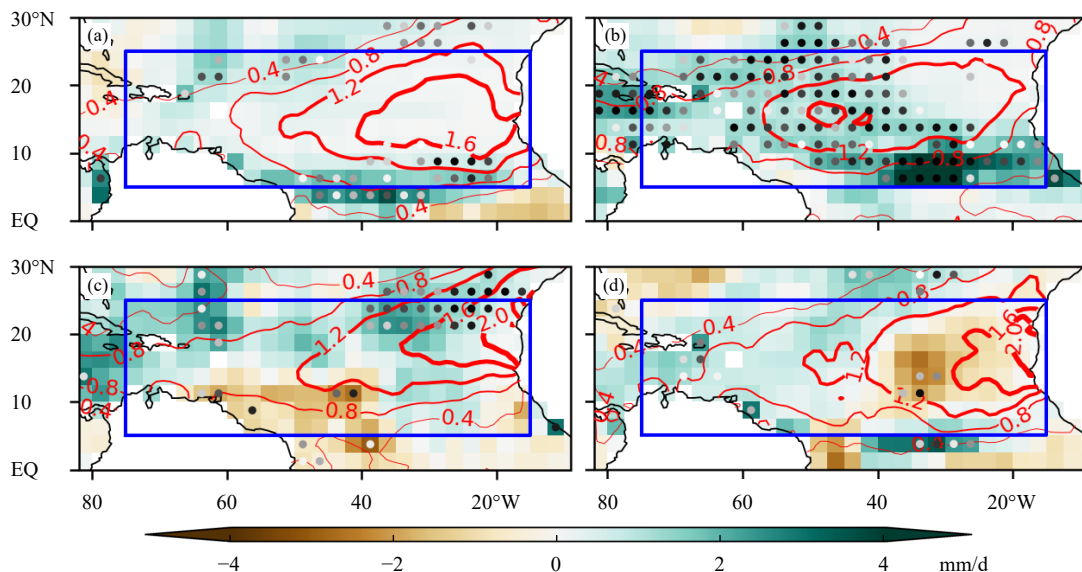


图 2 同图 1,但为无 ENSO 海温强迫

Fig. 2 Same as Fig. 1 but for years without ENSO SST forcing

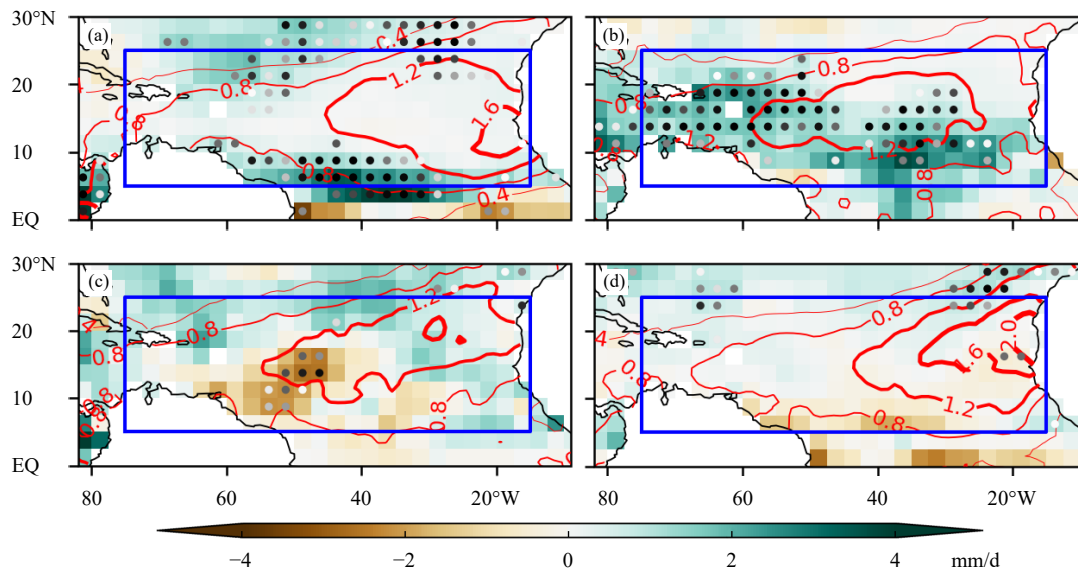


图3 同图1, 但为有 ENSO 海温强迫  
Fig. 3 Same as Fig. 1 but for years with ENSO SST forcing

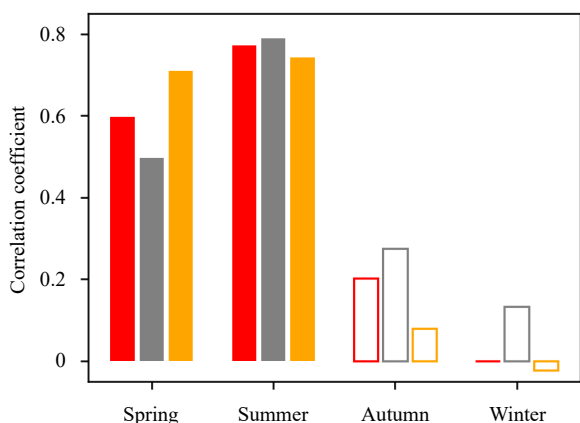


图4 1979—2023年各季节的热带北大西洋区域平均海温和降水异常的同期相关系数(红色表示所有年, 灰色表示无 ENSO 海温强迫, 黄色表示有 ENSO 海温强迫, 实心柱表示相关系数通过 95% 的信度检验)

Fig. 4 Simultaneous correlation coefficient of area-averaged sea surface temperature with precipitation over the tropical North Atlantic in four seasons during 1979–2023 (red bars indicate all years; gray bars indicate years without ENSO SST forcing; yellow bars indicate years with ENSO SST forcing; the solid bars represent values above the 95% confidence level)

et al, 1996; Li, et al, 1997; Gu, et al, 2006; 王懿彬等, 2022), 所以主要关注热带大西洋上的 ITCZ。春季, 热带大西洋暖池和 ITCZ 主要位于南北纬 10° 以内的赤道地区(图 5a)。到了夏、秋季, 随着太阳直射点向北移动, 热带大西洋暖池主要位于赤道

以北, ITCZ 及其相应的强对流活动也随之北移至热带北大西洋区域(图 5b、c)。冬季, 随着太阳直射点向南移动, 热带大西洋暖池范围明显减小, ITCZ 也南移至赤道大西洋上(图 5d)。更具体地, 检查了热带北大西洋局地(5°—25°N, 75°—15°W)区域平均的海温和降水年循环及各月年际变率的标准差。由图 6 可见, 热带北大西洋海温和降水有明显的年循环, 秋季海温最高, 区域平均接近 28°C, 而暖池区大部分区域能超过 28°C(图 5c), 同时降水也最强, 而春季海温最低、降水最少, 这与 ITCZ 的季节性南北移动有关。此外, 各月降水变率标准差大致随着区域平均降水强度的变化而变化, 夏、秋季较强, 而冬、春季较弱。海温变率则表现出春季相对最强的特征, 这很可能与冬季北半球活跃的大气环流异常和 ENSO 引起的沃克环流异常有关。值得注意的是, 春季海温变率最强的情况下, 降水变率却并不强, 这很可能与春季气候态海温偏低有关, 在较低的背景海温下, 只有海温异常达到一定强度, 才可能引起降水异常变化; 而秋季海温变率最弱, 降水变率却最强, 这主要是由于秋季气候态海温非常高, 局地水汽和大气不稳定能量充足, 当存在环流异常扰动带来上升运动时就能产生强烈的对流降水, 反之则没有, 此时降水异常与海温变率的关系较弱。

进一步, 对比了有无 ENSO 海温强迫下的热带

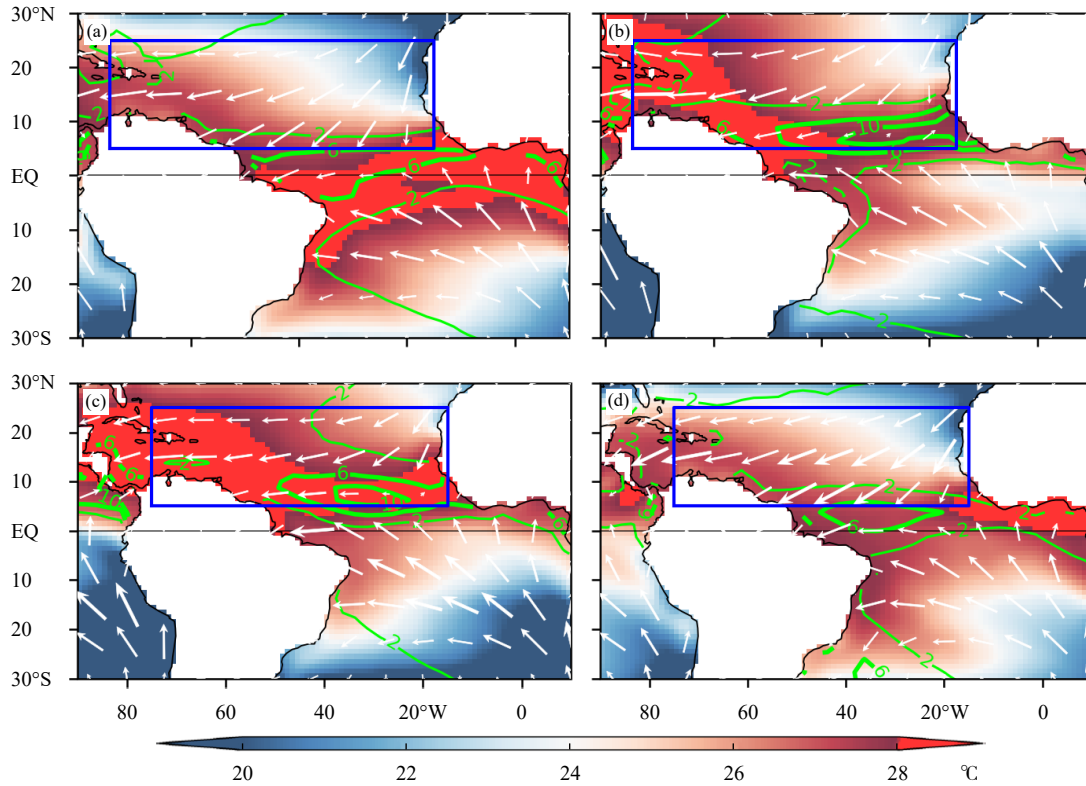


图5 1979—2023年的热带大西洋气候态海温(色阶)和降水强度(等值线,单位: mm/d)的空间分布(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季; 蓝色框是研究的热带北大西洋区域)

Fig. 5 Climatological mean of SST (shaded) and precipitation (contour, unit: mm/d) in the tropical Atlantic during (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter of 1979—2023 (the blue box denotes the tropical North Atlantic region)

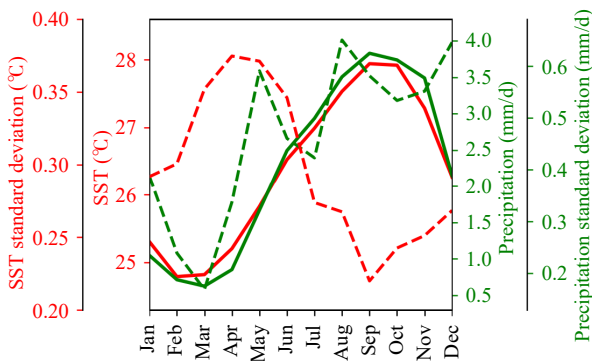


图6 1979—2023年的热带大西洋海温(红色)、降水(绿色)年循环(实线)及各月标准差(虚线)

Fig. 6 Climatological mean (solid lines) and standard deviation (dotted lines) of SST (red) and precipitation (green) in the tropical North Atlantic during 1979—2023

北大西洋正、负海温异常合成的降水和海温差值场(图7、8)。在无 ENSO 海温强迫的情况下,春、夏季的热带北大西洋的正海温异常对应着局地正降水异常(图7a、b),而秋、冬季则对应负降水异常(图7c、d),这与图2的结果类似。其中春季热带大

西洋暖池位于赤道附近,而热带北大西洋气候态海温较低,但由于春季该地区的海温异常较强(图6),因此容易突破对流阈值引起局地降水异常。夏季,暖池主要位于热带北大西洋区域,因此夏季的海温异常叠加在较高的背景态海温上极易激发局地对流异常。而在秋季,尽管暖池依旧位于热带北大西洋,但该区域的海温变率明显减弱(图6),因此没有显著的局地降水响应(图7c)。冬季则由于背景态海温相对较低,该区域海温异常很难突破对流阈值激发降水异常,因此海-气耦合较弱(图7d)。在有 ENSO 海温强迫情况下(图8),春季热带北大西洋的正海温异常对应着更强的局地正降水异常(图7a、8a),其他季节没有明显差异,这与图3的结果类似。那么为何 ENSO 影响下热带北大西洋区域海-气耦合存在这种季节差异? 一般情况而言, ENSO 主要通过沃克环流抑制热带大西洋的降水(Jiang F, et al, 2022),由于热带大西洋降水对 ENSO 的响应受到背景态年循环的调制而表现出经向移动,其

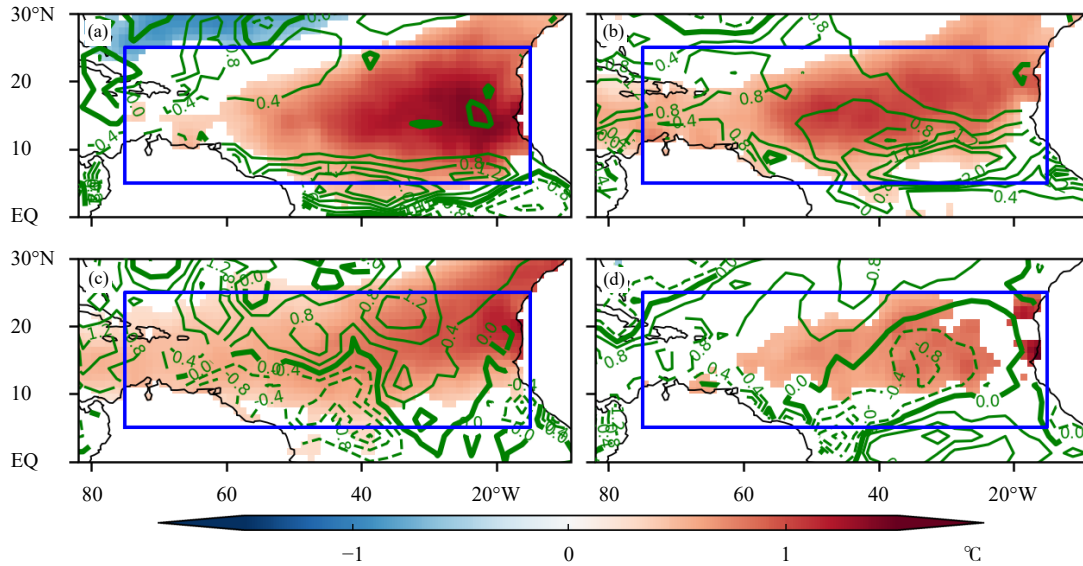


图7 在无 ENSO 海温强迫下(具体年份见表 2), NTA 正负异常年合成的海温(色阶)和降水(等值线,单位: mm/d)异常差值场(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季; 海温异常仅显示了通过 95% 信度检验的区域; 蓝色框是研究的热带北大西洋区域)

Fig. 7 Composite differences in SST (shaded) and precipitation (contour, unit: mm/d) between positive and negative phases of NTA for years without ENSO SST forcing during (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter (only SST anomalies above the 95% confidence level are shown; the blue box denotes the tropical North Atlantic region)

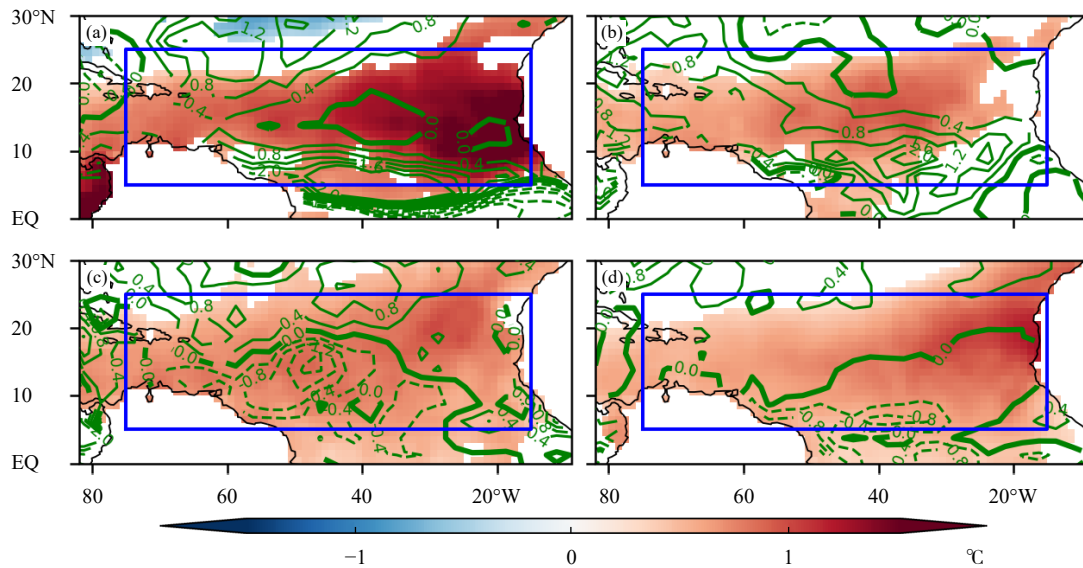


图8 同图 7, 但为有 ENSO 海温强迫

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for years with ENSO SST forcing

中春季降水负异常的区域最偏南(图 9)。另一方面, 春季热带北大西洋响应 ENSO 强迫产生较强的海温异常, 这导致在 ENSO 强迫下春季热带北大西洋局地海温异常与降水异常有更强的相关关系。而在其他季节, ENSO 对 NTA 的影响较弱, 因而其对该地区海-气耦合关系的调制作用就较弱。

为了验证上述观测的结论, 还进一步检查了

35 个 CMIP6 模式历史模拟的 1969—2014 年 NTA 与局地降水异常关系的季节差异。图 10 给出了模式模拟的各个季节 NTA 与降水异常的相关系数, 其中春、夏季的相关明显更强, 这与观测结果一致, 再次表明春、夏季 NTA 对激发局地降水异常具有重要作用。而在秋季, 模式模拟的该区域海温与降水异常为显著正相关, 这不同于观测中秋季海温与

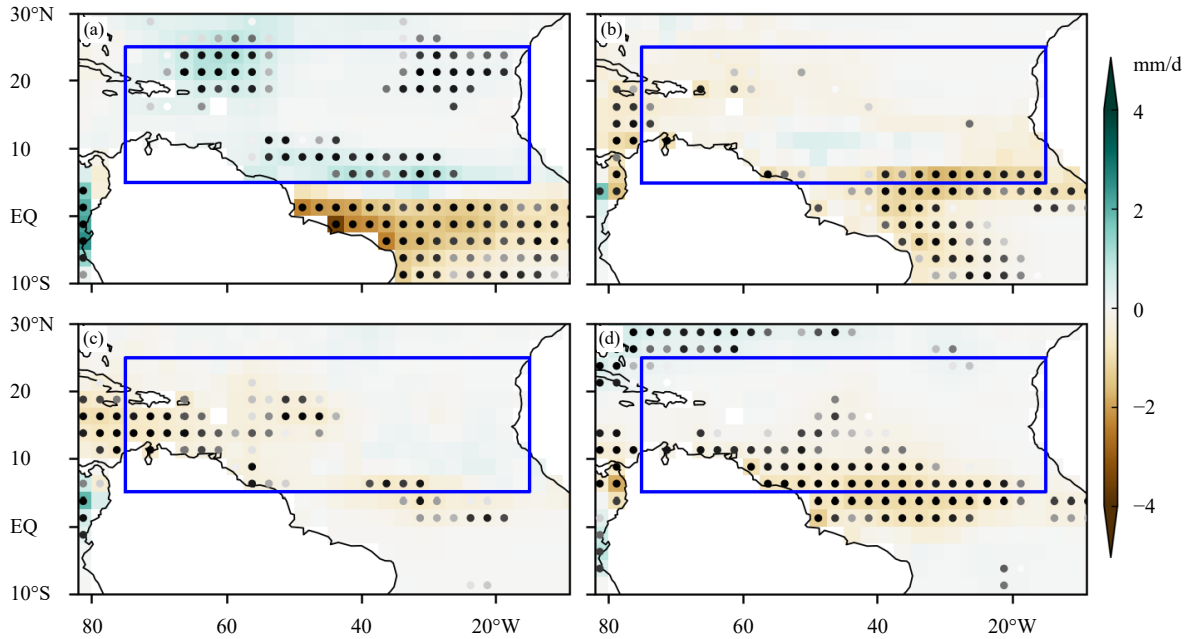


图9 1979—2023年 Nino3.4 指数回归的降水异常场 (a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季; 打点区表示通过 95% 信度检验, 蓝色框是研究的热带北大西洋区域)

Fig. 9 Regressed precipitation anomalies upon (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter Nino3.4 index (dots represent precipitation anomalies above the 95% confidence level; the blue box denotes the tropical North Atlantic region)

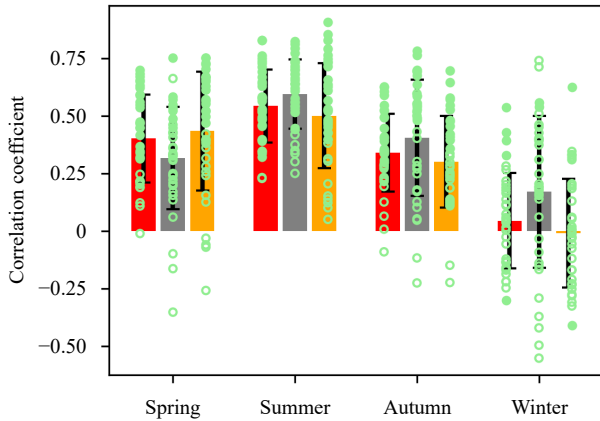


图10 CMIP6 模式历史模拟中 1969—2014 年各个季节 NTA 与局地降水异常的相关系数 (红色柱表示所有年的相关系数, 灰色柱和橙色柱分别表示在无 ENSO 海温强迫下和有 ENSO 海温强迫下的相关系数; 黑色误差条代表一个标准差的误差估计, 绿点表示各个模式的结果, 其中实心绿点代表通过 95% 信度检验)

Fig. 10 Correlation coefficient of area-averaged sea surface temperature with precipitation over the tropical North Atlantic for four seasons in CMIP6 historical simulations (red bars represent the correlation for all years, the gray and orange bars denote the correlation for years with and without ENSO SST forcing, respectively; the black error bar indicates one standard deviation error estimate, green circles show individual model's correlation and solid circles denote correlation above the 95% confidence level)

降水的弱耦合关系, 可能与模式模拟的 NTA 变率在秋季过强有关(图 11b)。冬季, 模式模拟的海温与降水异常的关系较弱, 这与观测中的结果一致, 表明冬季热带北大西洋正海温异常不能导致对流降水增多, 因此也不能产生远程气候影响。另外, CMIP6 模式模拟的 NTA 与局地降水异常关系在有 ENSO 强迫下的季节差异也与观测基本一致, 即 ENSO 强迫下春季热带北大西洋海-气耦合增强, 而其他季节有所减弱。另外, 值得关注的是, 虽然模式间差异较大, 但夏季 NTA 与降水异常的关系在大部分模式里都存在显著正相关, 这进一步证明了夏季热带北大西洋的强海-气耦合特征, 即正 NTA 能带来更强的对流降水正异常, 从而对全球气候有重要影响。虽然针对模式资料各季节选取的有无 ENSO 影响的年份与观测并不一致, 并且每个模式也有区别, 但这并不影响多模式模拟的结论。此外, 为检验模式对热带北大西洋海温和降水气候特征的模拟效果, 对比了模式模拟与观测的热带北大西洋气候态海温和降水, 以及各月海温和降水异常标准差, 虽然模式间存在较大差异, 但都表现出了热带北大西洋的基本气候特征。如图 11a 所示, 模式对热带北大西洋海温气候态的模拟普遍偏低,

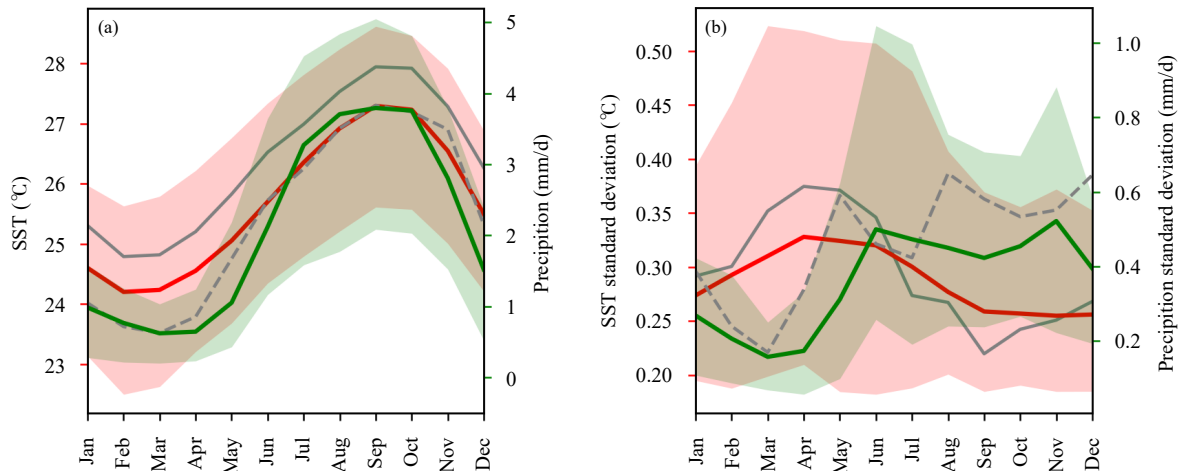


图 11 观测和 CMIP6 模式模拟的热带北大西洋区域平均海温和降水的气候态年循环 (a) 及标准差 (b) (灰色实线和虚线分别代表观测的海温和降水, 红色实线和绿色实线分别代表多模式平均的海温和降水, 阴影表示 35 个 CMIP6 模式的模拟区间)

Fig. 11 Annual cycles (a) and standard deviations (b) of area-average SST and precipitation in the tropical North Atlantic from observations and CMIP6 historical simulations (solid and dashed gray lines represent SST and precipitation in observation, respectively; red and green lines represent multi-model mean SST and precipitation, respectively; the shadows represent 35 CMIP6 simulation ranges)

多模式集合平均的降水气候态的量级与观测基本一致, 而对秋季降水气候态模拟, 模式间差异很大。模式模拟的海温异常标准差表现出与观测一致的特征, 即春季最强、秋季最弱, 但其量级在春季弱于观测, 而在秋季强于观测(图 11b)。

## 5 结论和讨论

基于 1979—2023 年的再分析海表温度、降水资料以及 1969—2014 年 CMIP6 模式的历史模拟资料, 分析了 NTA 与局地降水异常关系的季节性特征及其在有无 ENSO 强迫下的差异, 并探讨了其中可能的物理机制。主要结论概括如下:

(1) NTA 与局地降水异常的关系存在明显的季节差异。具体地, 在春、夏季, NTA 与局地降水异常存在显著的正相关, 表明春、夏季热带北大西洋正海温异常能导致降水增多, 反之亦然; 而秋、冬季, 该区域海温异常与降水异常的耦合关系明显较弱。

(2) NTA 与局地降水异常的这种季节差异主要与该区域海温气候态的季节循环及海温变率强弱有关。春季, 尽管气候态海温相对较低, 但春季较强的海温异常依旧能够突破对流阈值而引起降水异常; 夏季, 相对较弱的海温异常叠加在较高的气候态海温上也极易激发局地对流异常; 秋季, 该区域的海温异常很弱, 不易激发降水异常; 冬季, 由

于气候态海温相对较低, 该区域海温异常很难突破对流阈值激发降水, 海-气耦合关系较弱。

(3) 由于 ENSO 强迫对春季 NTA 影响很强, 而对该区域春季局地降水异常的影响相对较弱, 这导致春季该区域海-气耦合在 ENSO 强迫下比无 ENSO 强迫明显更强; 而 ENSO 对该区域其他季节海温异常的影响相对较小, 所以其对该区域其他季节海-气耦合程度的影响也相对较小。

本研究表明, 春、夏季 NTA 对局地对流及其相关气候影响具有明显的作用, 这对与 NTA 相关的天气、气候预测具有重要的科学意义和应用价值。值得注意的是, CMIP6 历史模拟可以很好地再现观测中 NTA 与局地降水异常在春季、夏季、冬季的耦合关系, 但却无法再现秋季该区域的海-气耦合关系。本研究的初步分析表明这可能与模式对 NTA 变率的模拟偏差有关, 将来可以进一步针对此偏差来源进行探究, 以期提高模式对于热带北大西洋地区海-气耦合关系的模拟能力, 继而提高气候模式的短期气候预测技巧。

## 参考文献

- 霍利微, 郭品文, 张福颖. 2016. 夏季热带北大西洋海温异常对西北太平洋热带气旋生成的影响. *大气科学学报*, 39(1): 55-63. Huo L W, Guo P W, Zhang F Y. 2016. Impact of summer tropical Atlantic SST anomaly

- on western North Pacific tropical cyclone genesis. *Trans Atmos Sci*, 39(1): 55-63 (in Chinese)
- 李忠贤, 于怡秋, 邓伟涛等. 2019. 春季北大西洋三极型海温异常变化及其与NAO和ENSO的联系. *气象科学*, 39(6): 721-730. Li Z X, Yu Y Q, Deng W T, et al. 2019. Variation characteristics of North Atlantic tri-polar sea surface temperature in spring and its relationship with NAO and ENSO. *J Meteor Sci*, 39(6): 721-730 (in Chinese)
- 王懿彬, 彭旭钢, 翁锦文等. 2022. 东北太平洋和北大西洋热带云团发展率特征的对比. *农业灾害研究*, 12(8): 121-124. Wang Y B, Peng X G, Weng J W, et al. 2022. Comparison of the characteristics of the development of tropical cloud clusters between the Northeast Pacific and the North Atlantic. *J Agric Catastrophol*, 12(8): 121-124 (in Chinese)
- 徐集云, 霍利微, 宋超辉等. 2019. 热带北大西洋海温异常对南海夏季风的影响及其机理. *大气科学学报*, 42(2): 293-302. Xu J Y, Huo L W, Song C H, et al. 2019. Influence of northern tropical Atlantic SST anomaly on South China Sea summer monsoon and its mechanism. *Trans Atmos Sci*, 42(2): 293-302 (in Chinese)
- 赵晓彤, 余锦华, 廖梓桦等. 2020. 北大西洋热带气旋生成频数变化对海温异常响应特征的研究. *热带气象学报*, 36(2): 208-218. Zhao X T, Yu J H, Liao A H, et al. 2020. Contribution of major SSTA modes to tropical cyclone genesis frequency over the North Atlantic. *J Trop Meteor*, 36(2): 208-218 (in Chinese)
- 郑建, 刘秦玉. 2010. 热带太平洋与热带大西洋海表温度主模态的相互作用. *海洋与湖沼*, 41(6): 799-806. Zheng J, Liu Q Y. 2010. The interactions between dominating modes of the sea surface temperature in tropical Pacific and tropical Atlantic. *Oceanol Limnol Sinica*, 41(6): 799-806 (in Chinese)
- Amaya D J, Foltz G R. 2014. Impacts of canonical and Modoki El Niño on tropical Atlantic SST. *J Geophys Res: Oceans*, 119(2): 777-789
- Brönnimann S. 2007. Impact of El Niño-Southern Oscillation on European climate. *Rev Geophys*, 45(3): 2006RG000199
- Carton J A, Cao X H, Giese B S, et al. 1996. Decadal and interannual SST variability in the Tropical Atlantic Ocean. *J Phys Oceanogr*, 26(7): 1165-1175
- Chang P, Fang Y, Saravanan R, et al. 2006. The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño. *Nature*, 443(7109): 324-328
- Chiang J C H, Sobel A H. 2002. Tropical tropospheric temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate. *J Climate*, 15(18): 2616-2631
- Covey D L, Hastenrath S. 1978. The Pacific El Niño phenomenon and the Atlantic circulation. *Mon Wea Rev*, 106(9): 1280-1287
- Dai A G, Wigley T M L. 2000. Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophys Res Lett*, 27(9): 1283-1286
- Enfield D B, Mayer D A. 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. *J Geophys Res: Oceans*, 102(C1): 929-945
- Enfield D B, Alfaro E J. 1999. The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific oceans. *J Climate*, 12(7): 2093-2103
- García-Serrano J G, Cassou C, Douville H, et al. 2017. Revisiting the ENSO teleconnection to the tropical North Atlantic. *J Climate*, 30(17): 6945-6957
- Gozdz O, Buckley M W, DelSole T. 2024. The impact of interactive ocean dynamics on Atlantic sea surface temperature variability. *J Climate*, 37(10): 2937-2964
- Graham N E, Barnett T P. 1987. Sea surface temperature, surface wind divergence, and convection over tropical oceans. *Science*, 238(4827): 657-659
- Gray W M. 1984. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb[hPa] quasi-biennial oscillation influences. *Mon Wea Rev*, 112(9): 1649-1668
- Gu G J, Adler R F. 2006. Interannual rainfall variability in the tropical Atlantic region. *J Geophys Res: Atmos*, 111(D2): D02106
- Hastenrath S, Heller L. 1977. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Quart J Roy Meteor Soc*, 103(435): 77-92
- Hastenrath S. 2012. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: A review. *Climatic Change*, 112(2): 243-251
- Hong C C, Chang T C, Hsu H H. 2014. Enhanced relationship between the tropical Atlantic SST and the summertime western North Pacific subtropical high after the early 1980s. *J Geophys Res: Atmos*, 119(7): 3715-3722
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J Atmos Sci*, 38(6): 1179-1196
- Hu S Q, Zhang W J, Jin F F, et al. 2023. Seasonal dependence of the Pacific-North American teleconnection associated with ENSO and its interaction with the annual cycle. *J Climate*, 36(20): 7061-7072
- Huang B. 2004. Remotely forced variability in the tropical Atlantic Ocean. *Climate Dyn*, 23(2): 133-152
- Jiang F, Zhang W J, Jin F F, et al. 2021. Meridional migration of ENSO impact on tropical Atlantic precipitation controlled by the seasonal cycle. *Geophys Res Lett*, 48(24): e2021GL096365
- Jiang F, Zhang W J. 2022. Understanding the complicated relationship between ENSO and wintertime North Tropical Atlantic SST variability. *Geophys Res Lett*, 49(5): e2022GL097889
- Jiang L S, Li T. 2021. Impacts of tropical North Atlantic and equatorial Atlantic SST anomalies on ENSO. *J Climate*, 34(14): 5635-5655
- Jiang L S, Li T M, Ham Y G. 2022. Critical role of tropical North Atlantic SSTA in Boreal Summer in affecting subsequent ENSO evolution. *Geophys Res Lett*, 49(8): e2021GL097606
- Johnson N C, Xie S P. 2010. Changes in the sea surface temperature threshold for tropical convection. *Nat Geosci*, 3(12): 842-845
- Jones J J, Bell M M, Klotzbach P J, et al. 2022. Wintertime Rossby wave breaking persistence in extended-range seasonal forecasts of Atlantic tropical cyclone activity. *J Climate*, 35(7): 2133-2147

- Kossin J P, Vimont D J. 2007. A more general framework for understanding Atlantic hurricane variability and trends. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(11): 1767-1782
- Kushnir Y, Seager R, Ting M F, et al. 2010. Mechanisms of tropical Atlantic SST influence on North American precipitation variability. *J Climate*, 23(21): 5610-5628
- Lau K M, Wu H T, Bony S. 1997. The role of large-scale atmospheric circulation in the relationship between tropical convection and sea surface temperature. *J Climate*, 10(3): 381-392
- Li T M, Philander S G H. 1997. On the seasonal cycle of the equatorial Atlantic Ocean. *J Climate*, 10(4): 813-817
- Markham C G, Mclain D R. 1977. Sea surface temperature related to rain in Ceará, north-eastern Brazil. *Nature*, 265(5592): 320-323
- Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, et al. 2001. North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms. *Int J Climatol*, 21(15): 1863-1898
- Mitchell T P, Wallace J M. 1992. The annual cycle in equatorial convection and sea surface temperature. *J Climate*, 5(10): 1140-1156
- Murakami H, Levin E, Delworth T L, et al. 2018. Dominant effect of relative tropical Atlantic warming on major hurricane occurrence. *Science*, 362(6416): 794-799
- Nobre P, Srukla J. 1996. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *J Climate*, 9(10): 2464-2479
- Pezzi L P, Cavalcanti I F A. 2001. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: Numerical study. *Climate Dyn*, 17(2): 205-212
- Philander S G H, Gu D, Lambert G, et al. 1996. Why the ITCZ is mostly north of the equator. *J Climate*, 9(12): 2958-2972
- 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. *J Geophys Res*, 108(D14): 4407
- Ren H C, Zuo J Q, Li W J. 2021. The impact of tropical Atlantic SST variability on the tropical atmosphere during boreal summer. *J Climate*, 34(16): 6705-6723
- Robertson A W, Mechoso C R, Kim Y J. 2000. The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation. *J Climate*, 13(1): 122-138
- Saravanan R, Chang P. 2000. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño-Southern Oscillation. *J Climate*, 13(13): 2177-2194
- Sasaki W, Doi T, Richards K J, et al. 2015. The influence of ENSO on the equatorial Atlantic precipitation through the Walker circulation in a CGCM. *Climate Dyn*, 44(1): 191-202,
- Saunders M A, Klotzbach P J, Lea A S R, et al. 2020. Quantifying the probability and causes of the surprisingly active 2018 North Atlantic hurricane season. *Earth Space Sci*, 7(3): e2019EA000852
- Sung M K, Ham Y G, Kug J S, et al. 2013. An alternative effect by the tropical North Atlantic SST in intraseasonally varying El Niño teleconnection over the North Atlantic. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, 65(1): 198-63
- Taschetto A S, Rodrigues R R, Meehl G A, et al. 2016. How sensitive are the Pacific-tropical North Atlantic teleconnections to the position and intensity of El Niño-related warming?. *Climate Dyn*, 46(5-6): 1841-1860
- Vimont D J, Kossin J P. 2007. The Atlantic Meridional Mode and hurricane activity. *Geophys Res Lett*, 34(7): L07709
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon Wea Rev*, 109(4): 784-812
- Wang C Z, Enfield D B, Lee S K, et al. 2006. Influences of the Atlantic warm pool on western hemisphere summer rainfall and Atlantic hurricanes. *J Climate*, 19(12): 3011-3028
- Wang H J, Luo D H. 2022. North Atlantic footprint of summer Greenland ice sheet melting on interannual to interdecadal time scales: A Greenland blocking perspective. *J Climate*, 35(6): 1939-1961
- Watanabe M, Kimoto M. 1999. Tropical-extratropical connection in the Atlantic atmosphere-ocean variability. *Geophys Res Lett*, 26(15): 2247-2250
- Williams A I L, Jeevanjee N, Bloch-Johnson J. 2023. Circus tents, convective thresholds, and the non-linear climate response to tropical SSTs. *Geophys Res Lett*, 50(6): e2022GL101499
- Xie L, Yan T Z, Pietrafesa L J, et al. 2005. Climatology and interannual variability of North Atlantic hurricane tracks. *J Climate*, 18(24): 5370-5381
- Xie S P, Carton J A. 2004. Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts//Wang C, Xie S P, Carton J A. *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*. Washington: American Geophysical Union, 121-142
- Yang Y, Xie S P, Wu L X, et al. 2018. ENSO forced and local variability of North Tropical Atlantic SST: Model simulations and biases. *Climate Dyn*, 51(11): 4511-4524
- Yin X X, Zhou L T. 2019. An interdecadal change in the influence of the Central Pacific ENSO on the subsequent north tropical Atlantic spring SST variability around the mid-1980s. *Climate Dyn*, 53(1): 879-893
- Yoon J H, Zeng N. 2010. An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Climate Dyn*, 34(2): 249-264
- Zhang W J, Mei X B, Geng X, et al. 2019. A nonstationary ENSO-NAO relationship due to AMO modulation. *J Climate*, 32(1): 33-43
- Zhang W J, Jiang F, Stuecker M F, et al. 2021. Spurious North Tropical Atlantic precursors to El Niño. *Nat Commun*, 12(1): 3096
- Zhang W J, Jiang F. 2023. Subseasonal variation in the winter ENSO-NAO relationship and the modulation of Tropical North Atlantic SST variability. *Climate*, 11(2): 47