

杨韵,李建平,谢飞,等.热带北大西洋模态年际变率的研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(8):808-817.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.08.0808.[Yang Yun,Li Jianping,Xie Fei,et al. Progresses and prospects for North Tropical Atlantic mode interannual variability[J]. Advances in Earth Science,2018,33(8):808-817.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.08.0808.]

热带北大西洋模态年际变率的研究进展与展望*

杨 韵,李建平,谢 飞,冯 娟,孙 诚

(北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875)

摘要:热带北大西洋模态(NTAM)年际变率是北半球春季热带北大西洋的主导变率。它对热带辐合带的南北移动、周边国家的降水以及全球气候都有显著的影响。通过回顾前人的相关研究,归纳了 NTAM 的几种形成机制,概括了 NTAM 对气候系统的影响,综述了模式对于 NTAM 年际变率的模拟能力,总结了以往研究进展中存在的薄弱环节。最后以此为契机,对未来 NTAM 的研究方向进行了展望。

关键词:热带北大西洋模态;年际变率;海气相互作用

中图分类号:P47

文献标志码:A

文章编号:1001-8166(2018)08-0808-10

1 引 言

大西洋经向模态(Atlantic Meridional Mode, AMM)是热带大西洋最重要的气候模态之一,呈现出南北半球海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)异常偶极子的空间形态(图 1a)^[1~3]。而北半球的这一极子(图 1a,黑色框)是热带北大西洋(0° ~ 30°N , 60°W ~ 20°E)春季 SST 经验正交分解(Empirical Nthogonal Function, EOF)的第一模态(图 1b),我们称之为热带北大西洋模态(North Tropical Atlantic Mode, NTAM)。NTAM 表现出季节锁相的特征,并在春季达到最大值(图 1c)。尽管如此,NTAM 在其他季节仍然活跃并表现出较强的可持续性。

NTAM 对大西洋上热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)有着明显的调节作用。当它处于正位相(SST 异常增暖)时,ITCZ 位置较平均态偏北;与之相对,负位相时 ITCZ 位置偏南^[1,2,4]。这一影响使得 NTAM 对沿岸国家的降水有着很强

的影响^[1,5~7]。此外,NTAM 对飓风的数量、强度、持续时间以及移动路线等都有着极大的调控作用^[8~10]。

NTAM 年际变率研究的开展主要集中在 20 世纪末和 21 世纪初,而最近十几年科学家们将注意力主要集中在热带太平洋和热带印度洋地区,相比之下对 NTAM 的研究较少。最近的研究发现,NTAM 可以通过“电容器效应”对厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)准 2 年振荡的位相转换起到辅助作用^[11~13]。此外,在年代际时间尺度上,NTAM 的异常增暖可以通过引发太平洋多年代际变率(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)的负位相,进而解释 21 世纪初的全球变暖“停滞”现象^[14~16]。这些新发现为 NTAM 的研究注入了新鲜血液,也重新引起了科学家们对热带大西洋的关注。

本文针对 NTAM 的生成机制、气候影响以及耦合模式的模拟能力做了系统回顾和讨论,并对 NTAM 研究的挑战进行了展望,以期对未来该领域的研究提供方向。需要说明的是,下文中所提及的季

收稿日期:2018-04-08;修回日期:2018-06-14.

*基金项目:国家重点研发计划项目“全球变化及应对”重点专项“全球变暖‘停滞’现象辨识与机理研究”(编号:2016YFA0601803);国家自然科学基金青年科学基金项目“印度洋偶极子年代际变率:ENSO 强迫和内部变率”(编号:41606008)资助。

作者简介:杨韵(1988-),女,辽宁鞍山人,讲师,主要从事海气相互作用和气候变化研究.E-mail:yunyang@bnu.edu.cn

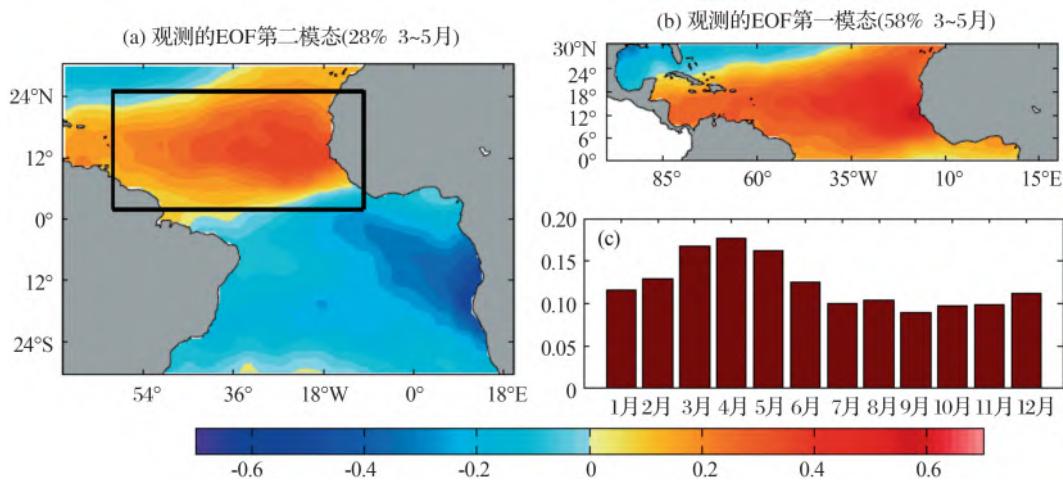


图 1 HadISST 1870—2017 年春季 SST

Fig.1 HadISST boreal spring SST during 1870-2017

(a) 热带大西洋($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{W} \sim 20^{\circ}\text{E}$) EOF 分解的第二模态, 黑框代表 AMM 北部的一支; (b) 热带北大西洋($0^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{W} \sim 20^{\circ}\text{E}$) EOF 分解的第一模态, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; (c) NTAM 指数(SST 在 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{W}$ 的均值)在不同月份的方差(单位: C^2)

(a) 2nd EOF mode over the tropical Atlantic ($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{W} \sim 20^{\circ}\text{E}$), the black box represents the northern pole of the AMM; (b) 1st EOF mode over the northern tropical Atlantic ($0^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{W} \sim 20^{\circ}\text{E}$) (unit: $^{\circ}\text{C}$); (c) The variance of NTAM index (SST averaged over $5^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{W}$) in calendar months (unit: C^2)

节如未特殊说明均是针对北半球而言。

2 生成机制

NTAM 的生成机制主要可以归纳为 4 种(图 2)。在下文中,我们将对各种机制分别进行回顾。

2.1 局地海气相互作用

Chang 等^[2]首先利用风—蒸发—SST (Wind-Evaporation-SST, WES) 正反馈机制^[17]解释了 NTAM 的生长过程。当热带北大西洋上空出现西南风异常时,它与背景东北信风方向相反,使得风速减弱,蒸发引起的潜热通量减小,SST 升高。而海温的升高将进一步降低局地海表气压 (Sea Level Pres-

sure, SLP), 增强西南风异常, 进而形成一个正反馈过程。在 WES 机制的作用下, SST 暖异常逐渐增大, 向赤道方向(背景风的下游方向)发展, 并且在春季(4月)达到鼎盛。这时, SST 异常的最大值在达喀尔沿岸并且向海盆西部逐渐减小。这一季节, ITCZ 位于全年的最南端——赤道附近。在 SST 异常增暖的作用下, ITCZ 产生向北的异常移动^[18,19]。

关于热带大西洋局地海气耦合过程是否为 NTAM 产生的主要原因, 科学家们产生了分歧。一些研究结果表明, NTAM 的产生可以仅依靠 WES 作用维持而不需要外部强迫^[3,18,20]。然而另一些研究强调 WES 机制的发展只限于靠近赤道的热带地区

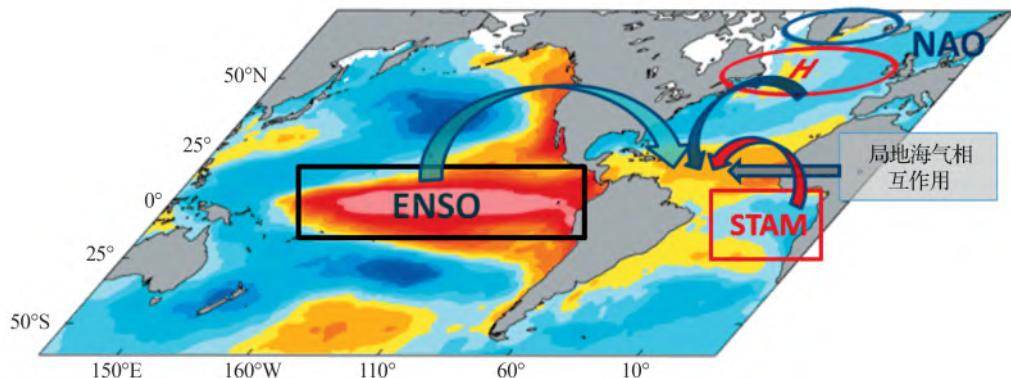


图 2 NTAM 的触发因子示意图

Fig.2 Schematic diagram of NTAM triggers

(0° ~ 10° N), 而在这以北的海域(10° ~ 30° N)则是以大气强迫海洋为主, 因此外部强迫机制是维持 NTAM 年际变率的关键^[19,21~23]。相关研究表明 3 月之后, 尽管 SST 异常仍然显著, 10° N 以北海域的风异常却迅速减弱并导致了 NTAM 的衰减。证明了此海域 SST 异常主要受到大气强迫引起的蒸发减弱影响, 而局地的海气相互作用则影响较弱^[23,24]。Amaya 等^[25]利用超前滞后相关分析指出, 10° N 以北海洋超前大气信号不显著, 进一步证明了 WES 机制(局地海气耦合作用)只存在于靠近赤道的热带地区。

Doi 等^[26,27]提出了另外一种局地海气耦合作用机制。在热带东北大西洋达喀尔沿岸(10° N, 22° W)附近存在一个温跃层抬升的圆顶形结构, 称为几内亚圆顶^[28,29]。Doi 等^[26,27]发现几内亚圆顶与 NTAM 有着很强的耦合作用。在 NTAM 暖事件的发展阶段, 圆顶的异常较弱, 混合层加深。这使得海洋对大气的蒸发冷却效应不敏感, SST 升高。伴随着 SST 的变化, ITCZ 发生向北的异常移动。这会导致圆顶区 Ekman 抽吸增强, 次表层变冷, 通过卷夹过程加速 NTAM 在夏季的消亡。

2.2 ENSO 强迫

ENSO 可以通过以下 4 种机制激发出 NTAM 事件。这里我们以厄尔尼诺事件为例进行说明。

(1) 太平洋—北美遥相关

厄尔尼诺发生时赤道中东太平洋 SST 异常增暖可以激发出球面 Rossby 波, 即太平洋—北美(Pacific North American pattern, PNA)遥相关波列, 将信号传到北大西洋。这会引起东北信风的异常, 进而通过减弱蒸发导致 SST 异常增暖^[30~33]。然而, PNA 强迫引起的北大西洋 SLP 异常位于在美国东南部, 在 NTAM 的西北方向并且距离较远。同时前文中指出 WES 过程只在靠近赤道的热带地区(0° ~ 10° N)起作用, 那么 SLP 异常是如何传到热带北大西洋的, 这一问题仍有待后续研究。

(2) 对流层加热

Chang 等^[34]发现, 厄尔尼诺发生时 SST 异常增暖可以加热大气, 引起对流层异常增暖。大气呈现出典型的 Gill(Gill-Matsuno pattern)响应^[35], 并在大气 Kelvin 波的作用下将暖异常向东传播, 到达大西洋。对流层的异常增暖导致热带大西洋大气稳定性增加, 减弱大气热对流和蒸发, 进而导致 SST 的异常增暖。我们将这一过程称为对流层加热(Tropospheric Temperature, TT)机制。

Saravanan 等^[36]指出, 厄尔尼诺事件之后海洋—大气之间的温度差以及湿度差也是 NTAM 增暖的重要原因。Chikamoto^[37]利用历史的船测资料证实了这一观点。他们的研究指出, 厄尔尼诺年时大气温度异常高于并且超前于 SST 异常, 抑制了海洋向上的感热通量, 导致 SST 升温。这与正常年份正好相反。

(3) 沃克—哈德来环流异常

厄尔尼诺发生时会引起纬向的沃克环流异常, 造成热带大西洋上出现异常下沉气流。这一异常会进一步引起经向的哈德来环流异常, 并在副热带高压区形成异常的上升气流, 导致反气旋减弱、东北信风减弱和蒸发减弱, 进而引起 SST 增暖^[38,39]。

(4) 亚马逊加热的影响

García-Serrano 等^[40]近期的研究指出 ENSO 可以通过影响亚马逊地区温度而间接激发出 NTAM 事件。厄尔尼诺发生时伴随着沃克环流异常, 亚马逊地区出现了异常的下沉气流。它抑制了当地强烈的蒸发作用, 减少了向上的潜热通量, 使得亚马逊地区温度升高。这一温度异常可以激发 Gill 响应, 并在热带大西洋赤道两侧产生一对反气旋。位于北半球的反气旋则会减弱东北信风, 减少蒸发引起的潜热通量, 并最终导致热带北大西洋增温。然而这一对反气旋异常位于亚马逊地区的东侧, 是什么样的机制导致了这对反气旋的向东移动, 这一问题尚不清楚。

以上 4 种机制解释虽然揭示了 ENSO 强迫 NTAM 的过程, 但是仍无法解释两者为何相差一个季节。前人研究表明, ENSO 在初夏开始形成并在冬季达到鼎盛, 而 ENSO 对 NTAM 的影响则是在冬季开始并在 ENSO 发生次年的春季达到最大值。热带地区大气对海洋 SST 异常的反应几乎是同时的^[41], 这无法解释为何 ENSO 与其强迫产生的 NTAM 相差一个季节。一些研究将这一问题归结于 ENSO 与 NTAM 的季节锁相不同^[24,40]。热带北大西洋 SST 在春季更为敏感, 这可能与 ITCZ 季节移动所引起的混合层深度、空气湿度、潜热通量以及短波辐射等的季节变化有关^[19]。而 Lee 等^[42]则强调 ENSO 持续性的作用。他们发现只有持续到春季的 ENSO 才能强迫出 NTAM。即使是 3 月突然衰亡的厄尔尼诺, 它的影响力也严重减弱, 不能引起春季热带北大西洋增暖。

近年来, 随着 ENSO 研究的逐步深入, 科学家们进一步将厄尔尼诺分为东太平洋型(Eastern Pacific, EP)厄尔尼诺和中太平洋型(Central Pacific, CP)厄

尔尼诺^[43~46]两大类。上文所述属于 EP 厄尔尼诺的影响。Amaya 等^[33]指出,当 CP 厄尔尼诺发生时只有热带北大西洋东北部的小范围海域 SST 变冷,而其他海域则没有明显的变化。这一空间结构明显不同于 EP 厄尔尼诺所引起的热带北大西洋整体变暖。这主要是由于 CP 厄尔尼诺产生的 PNA 遥相关波列以及 Gill 响应的 Kelvin 波都不如 EP 厄尔尼诺强。而过去的研究表明,CP 厄尔尼诺较 EP 厄尔尼诺表现出更明显的年代际变率^[46,47]。由此猜测未来 ENSO 对 NTAM 的影响也会在不同的年代中有所差异。这一猜测尚需要在未来的研究中进行验证。

2.3 热带南大西洋的影响

Chang 等^[2]用 WES 正反馈解释 NTAM 的形成过程中指出 AMM 总是成对出现。我们将南半球的这一极子称为热带南大西洋模态(South Tropical Atlantic Mode, STAM)。热带北大西洋的异常增暖会引起跨赤道的南风异常。在南半球,风异常在科氏力的作用下形成东南风异常,增强了背景的东南信风,潜热通量增加,SST 变冷。南北半球 SST 经向梯度进一步加强跨赤道气流,并在 WES 机制下发展成一对偶极子。根据这一 WES 机制,NTAM 正位相可以激发出 STAM 的负位相;反之,STAM 应该也可以触发 NTAM。这种 NTAM-STAM 偶极子结构在热带大西洋($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}, 60^{\circ}\text{W} \sim 20^{\circ}\text{E}$)EOF 分解中可以得到(图 1a)^[48,49]。

然而,在旋转 EOF 分解(Rotated EOF)中 NTAM-STAM 偶极子结构并不存在,相反 2 个极子独立于对方存在^[50,51]。并且观测资料显示 2 个极子的相关性并不高,进一步证实了两者独立存在的特性^[52,53]。

与此同时,观测数据也表明 NTAM-STAM 这一对偶极子在有些年份里同时出现,而另一些年份里则没有。这引出一个科学问题:NTAM 和 STAM 是对方的触发因子吗?如果不是,什么情况下两者会同时出现呢?Yang 等^[24]利用太平洋—全球大气(Pacific Ocean-Global Atmosphere, POGA)实验分离 ENSO 影响。实验结果发现,ENSO 发生时,在 PNA、沃克环流等作用下 NTAM 和 STAM 往往成对出现;而去除 ENSO 影响后,NTAM 无法激发出 STAM。这一结果再次证实了 NTAM 和 STAM 是相互独立的。

2.4 北大西洋涛动的影响

北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)表现为冰岛低压和副热带高压之间跷跷板式的异常活动^[54~57]。当 NAO 处于负位相时,副热带高压减

弱,热带北大西洋出现西南风异常。这一风异常将减弱背景东北信风,减少蒸发引起的向上的潜热通量,并最终导致 SST 异常增暖^[24,58]。NAO 不仅是 NTAM 的触发机制,而且对 NTAM 的季节锁相有着至关重要的作用。Yang 等^[24]研究发现,当耦合模式中 NAO 的发展较观测滞后 1 个月时,NTAM 的发展和成熟期都落后于观测 1 个月。另外,NTAM 对大气强迫不仅仅是被动响应,还可以强迫 NAO^[11,59]。

NTAM 与北大西洋的其他几种海温模态联系紧密。在北大西洋($20^{\circ} \sim 70^{\circ}\text{N}$),最重要的 2 个海洋模态是北大西洋三极子(North Atlantic Tripole, NAT)以及北大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)^[56,57]。NAT 与 NAO 联系紧密,并在冬季达到最大值;随着时间的推移,NAT 在热通量的作用下演化为夏季的北大西洋马蹄型模态(North Atlantic Horseshoe, NAH)^[60]。尽管发生的季节不同,NTAM 与 NAT 和 NAH 联系紧密,这是由于三者均受到大气变率 NAO 的影响(表 1)。NAT 的热带极子与 NTAM 空间结构非常相似(相关系数为 -0.88),并且 2 个序列显著相关(相关系数为 -0.24)。NAH 与 NTAM 相关系数则为 -0.16(通过 95% 信度检验)。这种相关关系也是导致 NTAM 海温持续性的原因。另外,NTAM 也表现出很强的年代际特征,这主要与 AMO 有关^[9],两者的相关系数达到了 0.64。

表 1 NTAM 与其他变率的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between NTAM and other variability

	NAT	NAH	Atlantic Niño	AMO (年代际)
相关系数	-0.24	-0.16	-0.08*	0.64

注: * 表示未通过 95% 置信度检验

NTAM 与大西洋尼诺没有明显相关($r = -0.08$)。Servain 等^[61]指出,春季 NTAM 的正位相能够激发出赤道及其以南海域的东风异常,并通过 Bjerknes 机制和 WES 机制发展成为夏季大西洋尼娜(大西洋尼诺的负位相)。Foltz 等^[62]进一步研究两者的关系,提出了 NTAM 通过 Rossby 波反射来影响大西洋尼诺的正相关机制,并解释了 2009 年的大西洋尼娜现象^[63]。值得注意的是,这一延迟的 Rossby 波反射机制与 Servain 等^[61]提出的负相关机制相互抵消。在这 2 种机制的共同作用下,NTAM

和大西洋尼诺相关不显著。然而, Richter 等^[64] 反驳说, 海洋上层 100 m 热含量数据显示 Rossby 波并没有出现西边界反射现象。他们将 NTAM 和大西洋尼诺的正相关机制归因为海流的输运作用。

2.5 不同机制间的相互作用

前文中回顾了几种 NTAM 触发因子。任何一次 NTAM 事件都不是由单一因子单独作用导致的, 而是不同因子间协同作用的结果。例如, 1970 年代中期的 NTAM 极端冷事件就是拉尼娜和 NAO 正位相共同作用的结果。然而, ENSO 和 NAO 并不总是互相促进, 有时两者的作用也会相互抵消。例如: 1982/1983 年的强厄尔尼诺与 NAO 正位相的影响相互抵消, 导致当年的 NTAM 事件较 70 年代中期的

事件弱很多^[23]。

不同触发因子激发的 NTAM 特征也略有不同^[24]。尽管 NAO 和 ENSO 激发的 NTAM 都在 4 月达到最大值, 但是前者激发的 NTAM 在 10 月开始发展, 早于后者 2 个月。而且 NAO 激发的 NTAM 最大值中心在达喀尔沿岸, 且向西部递减; 而 ENSO 引发的 NTAM 则表现为海盆内变暖比较一致。此外, NTAM 的可预报性在加入 NAO、SST 持续性等因子后, 较 ENSO 单因子有显著提高。

3 对气候的影响

作为热带海洋变率, NTAM 不仅对热带大西洋沿岸国家, 而且全球气候系统有着深远的影响(图 3)。

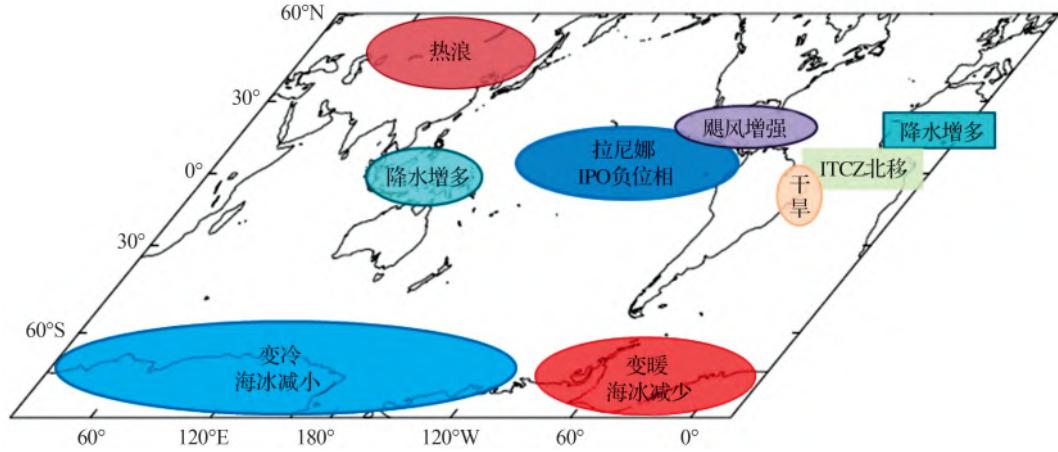


图 3 NTAM 的气候影响示意图

Fig.3 Schematic diagrams of NTAM impacts on global climate

3.1 对周围陆地的影响

NTAM 模态对热带大西洋沿岸国家的降水有着很强的影响。它最早受到关注是因为其对巴西东北部降雨的显著影响^[4,5]。巴西东北部是典型的半干旱地区, 降水具有显著的季节性, 全年的降水主要集中在春季^[6,7]。这一地区人口稠密, 且农业是其主要产业, 受气象条件影响严重。1958 年发生的 NTAM 暖事件使这一地区发生严重干旱, 导致居住在这里的 1 000 万民众被迫离开家园, 经济损失超过 8 亿美元^[5,65,66]。类似的旱灾在 1993 年再次上演^[67]。相反, 当 NTAM 处于负位相时巴西东北部降雨偏多, 例如: 2009 年的洪涝^[68]。此外, NTAM 对非洲西部的降水也有很强的调节作用, 但是这一影响要弱于巴西东北部^[69,70]。研究表明, 西非夏季降水受到 ITCZ 南北移动的强烈影响。当 NTAM 处于正位相时, 热带北大西洋 SST 变暖导致 ITCZ 向北移动, 西

非降水增多。这一结果在年际和年代际时间尺度上都有显示^[69,71]。

尽管 NTAM 在春季达到最大, 它对夏季飓风有着极大的调控作用^[8~10], 这严重影响着沿岸国家的极端降水事件。NTAM 正位相发生时, 大西洋飓风发生源地($90^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$)海温升高, 气旋能量指数升高。与之对应的气旋总数和持续时间均有所上升, 但是它与气旋强度的关系并不显著^[9]。不仅如此, Xie 等^[8]的研究表明, NTAM 对飓风路径也有影响, 正位相时登录美国东南沿海的飓风数量明显增多。

3.2 对全球气候的影响

NTAM 不仅可以影响局地的气候, 更能进一步影响全球气候系统^[11~13]。Ham 等^[12]发现 NTAM 正位相发生时会引发西太平洋低层反气旋, 导致赤道东风爆发, 并引发当年冬季的拉尼娜事件。这一机

制为 ENSO 的准两年振荡的位相转换起到了辅助作用。冬季的拉尼娜事件进一步对东亚气候产生剧烈影响,包括海洋大陆的同期暴雨和次年春季亚洲北部的热浪现象^[24]。在年代际时间尺度上,NTAM 与 AMO 联系紧密^[9]。正位相发生时 SST 增暖可以通过 TT 机制导致印度洋增暖,并进一步引起沃克环流异常,触发太平洋多年代际变率 IPO 负位相^[16]。而 IPO 与全球平均温度联系紧密^[72],其负位相发生时全球平均温度降低。这一降温作用与人类活动引起的全球变暖相叠加,进而导致了 21 世纪初的全球变暖“停滞”现象^[14~16]。

3.3 对南极海冰的影响

观测结果显示,近几十年南极海冰增加,并在 2014 年达到历史新高值^[73,74]。这一结果与全球变暖作用相反,引起科学家们的广泛重视。Li 等^[75,76]研究表明,在年代际时间尺度上 NTAM 的正位相会引发准定常大气 Rossby 波,导致南澳大利亚 SLP 升高以及阿蒙森海 SLP 降低。而后者的 SLP 变化进一步通过热量水平输送和风应力强迫 2 个过程导致海冰的重新分配以及南极总海冰增加。

4 模式模拟能力

尽管前人很多研究评估了耦合模式对于热带太平洋和热带印度洋年际变率的模拟能力^[77~80],但是关于热带大西洋的研究仍然较少。前人利用政府间气候变化专门委员会(Intergovernment Panel on Climate Change, IPCC)第五次耦合模式比较计划(The fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5)研究了模式对于 NTAM 的模拟情况^[24,81,82]。耦合模式对于 NTAM 的模拟能力要分为 2 个区域,离赤道较远的热带地区($10^{\circ}\sim30^{\circ}\text{N}$)以及靠近赤道的热带地区($0^{\circ}\sim10^{\circ}\text{N}$)。我们针对 2 个区域分别进行总结。

4.1 离赤道较远的热带大西洋

在这一区域,耦合模式能够较好地抓住 NTAM 的基本特性。CMIP5 中异常西南风的出现减弱了背景的东北风,使得蒸发减小,向上的潜热通量减小,SST 增暖。暖中心最大值在达喀尔沿岸,并且向海盆西边逐步减小。

与此同时,模式模拟的 NTAM 也存在一定的问题。首先,模式中 NTAM 的振幅要小于观测值,这样的问题在 CMIP3 模式中存在,在 CMIP5 中并没有得到明显改善^[25,82]。其次,CMIP5 模式中 NTAM 没有明显的季节锁相。大部分模式中 NTAM 并没有

在夏季迅速消亡,而是全年一直存在,显示出了极大的 SST 持续性^[25]。最后,尽管大多数模式模拟的 NTAM 都展现出显著的年际变率,但是其频谱中年代际的强度要明显高于观测结果^[25]。

4.2 靠近赤道的热带大西洋

在靠近赤道的热带地区,模式对于大西洋的模拟能力存在较大的问题,而这些问题很多来自于平均态的模拟。因此我们首先回顾 CMIP5 模式在赤道大西洋平均态的模拟误差。模式中春季的强降雨分为 2 支,一支在赤道附近与观测位置相近;而另一支则出现在了南半球,且部分模式中这一支的降雨量甚至超过了赤道地区,我们称之为双 ITCZ 误差^[83~87]。这是由于模式中 SST 极大值出现在了热带南大西洋所导致的^[24,26,88]。与此同时,模式中春季赤道东风明显弱于观测,有些甚至表现为赤道西风。在这异常西风的作用下,冷水向东堆积使得这里的温跃层加深。这严重阻碍了夏季冷舌的发展,并最终造成了赤道上东部比西部暖,与观测结果相反^[82,84,89]。这样的 SST 误差通过 Bjerknes 正反馈机制^[90]发展,并且减弱赤道上空的大气环流^[86,91,92]。一系列的平均态误差不仅出现在耦合模式中,而且在大气模式中也存在,其产生的原因尚不清楚,有待后续研究^[93]。

这些平均态误差导致模式模拟的 NTAM 在此区域与观测相比有较大的偏离。在半数 CMIP5 模式中,NTAM 除了在达喀尔沿岸 SST 异常达到最大值之外,在赤道以北的一个狭长海域存在另外一个极大值中心($2^{\circ}\sim8^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\sim15^{\circ}\text{W}$),我们将其称之为 SBEV (Spurious Band of Enhanced SST Variance)^[81]。SBEV 的产生主要与赤道东风异常有关^[81],这与观测中由 WES 机制产生的西南风异常不同,反映了模式在此海域对海气耦合作用模拟存在着较大的误差^[25]。不仅如此,SBEV 误差的存在也使得模式中 NTAM 和大西洋尼诺联系过于紧密。观测中 NTAM 与大西洋尼诺没有明显的关系。而模式中,SBEV 在春季出现时伴随着赤道东风异常,会通过 Bjerknes 正反馈机制激发出夏季大西洋尼诺^[81]。

综上,CMIP5 模式在远离赤道的热带海域对 NTAM 具有模拟能力,而在靠近赤道的海域则存在较大的误差,这与模式对此区域平均态的模拟误差密切相关。

5 结论与展望

本文对 NTAM 年际变率研究的相关进展作了

回顾。从局地海气相互作用、NAO 的影响、ENSO 强迫、以及热带南大西洋的影响这几个方面归纳了 NTAM 的主要生成机制。并且将热带大西洋划分为离赤道较远的(10° ~ 30° N)和靠近赤道的(0° ~ 10° N)2个区域,分别总结了2个区域中耦合模式的模拟能力。未来研究 NTAM 年际变率应该关注如下方面:

(1) ENSO 与 NTAM 的季节差。ENSO 在冬季达到鼎盛,但其对 NTAM 的影响在冬季开始发展并且在春季达到最大值。前人研究表明,热带地区大气对海洋 SST 异常的响应几乎是同时的^[51],那么是什么作用导致 ENSO 的影响出现了延迟,又或者是什么过程储存了 ENSO 的能量并在春季释放,这些问题仍有待深入研究。

(2) PNA 强迫。观测数据显示,PNA 强迫引起的北大西洋 SLP 异常位于美国东南部,在 NTAM 的西北方向并且距离较远。而 WES 过程只在靠近赤道的热带地区(0° ~ 10° N)起作用,那么 SLP 异常是如何激发出 NTAM 的,中间有哪些物理过程被遗漏掉了,值得深思。

(3) 沃克与哈德来环流异常。热带地区的 SST 异常升温(降温)会引起沃克与哈德来环流异常。而它的水平尺度由什么因素决定,如何确定异常的上升支和下沉支的位置,其影响为什么会有南北半球不对称的现象?这一系列问题仍有待进一步探索。

(4) 提高耦合模式对于热带大西洋的模拟能力。CMIP5 对于热带大西洋平均态的模拟仍然存在较大的问题,如前面提到的春季赤道东风以及 ITCZ 位置的模拟。这些平均态误差极大程度影响了模式中的海气相互作用,导致 NTAM 靠近赤道部分的模拟误差。不仅如此,模式中 NTAM 与其他变率的相互作用以及 NTAM 对陆地降雨的影响也产生了极大的偏差。模式的严重误差极大程度地限制了科学家们对于 NTAM 的探索。

(5) 关于 NTAM 在全球变暖后变化的研究较少。全球变暖后,热带北大西洋气候平均态发生变化(例如:SST 变暖)。NTAM 的年际变率产生什么样的影响,这一方面的研究仍然较少。这可能与气候模式在热带大西洋较强的模式误差有关。

总之,前人为 NTAM 年际变率的研究奠定了基础,但是仍有许多问题无法用已有的理论解决,有待后续更深入的研究。随着 NTAM 对 ENSO 位相转换以及对全球变暖“停滞”影响的发现,热带大西洋再

次成为了研究焦点,相信在不久的将来会取得突破性的成果。

参考文献(References):

- [1] Xie Shangping, Carton J A. Tropical Atlantic Variability: Patterns, Mechanisms, and Impacts on Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction [M]. American Geophysical Union, 2004: 121-142. DOI: 10.1029/147GM07.
- [2] Chang Ping, Ji L, Li H. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions [J]. *Nature*, 1997, 385(6 616): 516-518.
- [3] Huang Bohua, Shukla J. Ocean-atmosphere interactions in the tropical and subtropical atlantic ocean [J]. *Journal of Climate*, 2010, 18(11): 1 652-1 672.
- [4] Markham C G, McLain D R. Sea surface temperature related to rain in Ceará [acute], North-Eastern Brazil [J]. *Nature*, 1977, 265(5 592): 320-323.
- [5] Hastenrath S, Heller L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1977, 103(435): 77-92.
- [6] Hastenrath S. Interannual variability and annual cycle: Mechanisms of circulation and climate in the tropical atlantic sector [J]. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(6): 1 097-1 107.
- [7] Hastenrath S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: A review [J]. *Climatic Change*, 2012, 112(2): 243-251.
- [8] Xie Lian, Yan Tingzhuang, Pietrafesa L J, et al. Climatology and interannual variability of North Atlantic hurricane tracks [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(24): 5 370-5 381.
- [9] Vimont D J, Kossin J P. The Atlantic Meridional Mode and hurricane activity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(7): 248-265.
- [10] Vimont D J. Analysis of the atlantic meridional mode using linear inverse modeling: Seasonality and regional influences [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1 194-1 212.
- [11] Wu Lixin, He Feng, Liu Zhengyu, et al. Atmospheric teleconnections of tropical atlantic nariability: Interhemispheric, tropical extratropical, and cross-basin interactions [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(20): 856-870.
- [12] Ham Y G, Kug J S, Park J Y, et al. Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/Southern Oscillation events [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(2): 112-116.
- [13] Yu Jinhua, Li T, Tan Zhemin, et al. Effects of tropical North Atlantic SST on tropical cyclone genesis in the western North Pacific [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(3/4): 1-13.
- [14] Lin Xiaopei, Xu Lixiao, Li Jianping, et al. Research on the global warming hiatus [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 995-1 000. [林霄沛, 许丽晓, 李建平, 等. 全球变暖“停滞”现象辨识与机理研究 [J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 995-1 000.]
- [15] Chikamoto Y, Timmermann A, Luo J J, et al. Skilful multi-year predictions of tropical trans-basin climate variability [J]. *Nature*

- Communications*, 2015, 6:6 869.
- [16] Li Xichen, Xie Shangping, Gillett S T, et al. Atlantic-induced pan-tropical climate change over the past three decades[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(3):275-279.
- [17] Xie Shangping, Philander S G H. A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific[J]. *Tellus*, 1994, 46(4):340-350.
- [18] Wu Lixin, Zhang Qiong, Liu Zhengyu. Toward understanding tropical Atlantic variability using coupled modeling surgery[M] // *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*. American Geophysical Union, 2004:157-170.
- [19] Chiang J C H, Sobel A H. Tropical tropospheric temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(18):2 616-2 631.
- [20] Mahajan S, Saravanan R, Chang P. Free and forced variability of the tropical Atlantic Ocean: Role of the wind-evaporation-sea surface temperature feedback[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(23):5 958-5 977.
- [21] Xie Shangping. A dynamic ocean-atmosphere model of the tropical Atlantic decadal variability[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(12):64-70.
- [22] Chang Ping, Ji L, Saravanan R. A hybrid coupled model study of tropical Atlantic variability[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(3):361-390.
- [23] Czaja A, Van Der Vaart P, Marshall J. A diagnostic study of the role of remote forcing in Tropical Atlantic variability[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(22):3 280-3 290.
- [24] Yang Y, Xie S P, Wu L, et al. Causes of enhanced SST variability over the equatorial Atlantic and its relationship to the Atlantic zonal mode in CMIP5[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(16):6 171-6 182.
- [25] Amaya D J, Deflorio M J, Miller A J, et al. WES feedback and the Atlantic Meridional Mode: Observations and CMIP5 comparisons[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49(5/6):1 665-1 679.
- [26] Doi T, Tozuka T, Yamagata T. The Atlantic meridional mode and its coupled variability with the Guinea Dome[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(2):455.
- [27] Doi T, Tozuka T, Yamagata T. Interannual variability of the Guinea Dome and its possible link with the Atlantic Meridional Mode[J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(7/8):985-998.
- [28] Rossignol M, Meyrueis A M. Campagnes oceanographiques du Gérad-Treca, Cent. Oceanogr[M]. Dakar, Senegal; Dakar-Thiaroye, ORSTOM, 1964: 53.
- [29] Oettli P, Yushi M, Toshio Y. A regional climate mode discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:18 782.
- [30] Enfield D B. Tropical Atlantic SST variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans Banner*, 1997, 102(C1):929-945.
- [31] Giannini A, Kushnir Y, Cane M A. Interannual variability of Caribbean rainfall, ENSO, and the Atlantic Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(13):297-311.
- [32] Huang Bohua. Remotely forced variability in the tropical Atlantic Ocean[J]. *Climate Dynamics*, 2004, 23(2):133-152.
- [33] Amaya D J, Foltz G R. Impacts of canonical and Modoki El Niño on tropical Atlantic SST[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2014, 119(2):777-789.
- [34] Chang Ping, Fang Y, Saravanan R, et al. The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño[J]. *Nature*, 2006, 443(7 109):324-328.
- [35] Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(449):447-462.
- [36] Saravanan R, Chang P. Interaction between Tropical Atlantic variability and El Niño-Southern Oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(D14):2 177-2 194.
- [37] Chikamoto Y. Tropical Atlantic Ocean-Atmospheric Response to Tropical Pacific SST Variations[D]. Sapporo, Japan: Hokkaido University, 2002.
- [38] Klein S A. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(12):917-932.
- [39] Wang Chunzai. ENSO, Atlantic climate variability, and the Walker and Hadley circulations[M] // *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*. Netherlands: Springer Netherlands, 2004:173-202.
- [40] García-Serrano J, Cassou C, Douville H, et al. Revisiting the ENSO teleconnection to the tropical North Atlantic[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(17).DOI:10.1175/JCLI-D-16-0641.
- [41] Giannini A, Chiang J C H, Cane M A, et al. The ENSO teleconnection to the Tropical Atlantic Ocean: Contributions of the remote and local SSTs to rainfall variability in the Tropical Americas[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(24):4 530-4 544.
- [42] Lee S, Enfield D B, Wang C. Why do some El Niños have no impact on tropical North Atlantic SST? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35:537-537.
- [43] Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. El Niño in a changing climate[J]. *Nature*, 2009, 461: 511-514. DOI: 10.1038/nature08316.
- [44] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2007, 112(C11):C11007.DOI:10.1029/2006JC003798.
- [45] Kug J S, Jin Feifei, An S I. Two types of El Niño events: Cold Tongue El Niño and Warm Pool El Niño[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(22):1 499-1 515.
- [46] McPhaden M J, Lee T, McClurg D. El Niño and its relationship to changing background conditions in the tropical Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(15):175-188.
- [47] Yeh S, Kirtman B P, Kug J, et al. Natural variability of the central Pacific El Niño event on multi-centennial timescales[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(2):79-89.
- [48] Nobre P, Srivastava J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the Tropical Atlantic and South America[J]. *Journal of Climate*, 1996, 18(1):73-84.

- [49] Ruizbarradas A, Carton J A, Nigam S. Structure of interannual-to-decadal climate variability in the Tropical Atlantic Sector [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(18): 285-3 297.
- [50] Houghton R W, Tourre Y M. Characteristics of low-frequency sea surface temperature fluctuations in the Tropical Atlantic [J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(7): 765-772.
- [51] Mehta V M. Variability of the tropical ocean surface temperatures at decadal-multidecadal time scales. Part I: The Atlantic Ocean [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(9): 2 351-2 375.
- [52] Mehta V M, Delworth T. Decadal variability of the Tropical Atlantic Ocean surface temperature in shipboard measurements and in a Global Ocean-Atmosphere Model [J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(8): 172-190.
- [53] Enfield D B, Mestas-Nuñez A M, Mayer D A, et al. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 7 841-7 848.
- [54] Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, et al. North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(15): 1 863-1 898.
- [55] Yao Yao, Luo Dehai. The North Atlantic Oscillation (NAO) and Europe Blocking and their impacts on extreme snowstorms: A review [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(6): 581-594.
[姚遥, 罗德海. 北大西洋涛动—欧洲阻塞及其对极端暴雪影响的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2016, 31(6): 581-594.]
- [56] Wu Lixin, Liu Zhengyu. North Atlantic decadal variability: Air-sea coupling, oceanic memory, and potential Northern Hemisphere resonance [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(2): 331-349.
- [57] Yang Yun, Wu Lixin, Fang Changfang. Will global warming Suppress North Atlantic Tripole decadal variability? [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(6): 2 040-2 055.
- [58] Czaja A, Robertson A W, Huck T. The role of Atlantic Ocean-atmosphere coupling in affecting North Atlantic oscillation variability [J]. *North Atlantic Oscillation Climatic Significance & Environmental Impact*, 2003, 134: 147-172.
- [59] Robinson W A, Li Shuanglin, Peng S. Dynamical nonlinearity in the atmospheric response to Atlantic sea surface temperature anomalies [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(20): 315-331.
- [60] Yang Yun, Wu Lixin. Changes of air-sea coupling in the North Atlantic over the 20th century [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(4): 445-456.
- [61] Servain J, Wainer I, Jr M C, et al. Relationship between the equatorial and meridional modes of climatic variability in the tropical Atlantic [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(4): 485-488.
- [62] Foltz G R, McPhaden M J. Abrupt equatorial wave-induced cooling of the Atlantic cold tongue in 2009 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(24): 701-719.
- [63] Foltz Gregory R, McPhaden Michael J. Interaction between the Atlantic meridional and Niño modes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: 44 727-44 734.
- [64] Richter I, Behera S K, Masumoto Y, et al. Multiple causes of interannual sea surface temperature variability in the equatorial Atlantic Ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(1): 43-47.
- [65] Namias J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil [J]. *Tellus*, 1972, 24(4): 336-343.
- [66] Marengo J A, Torres R R, Alves L M. Drought in Northeast Brazil—Past, present, and future [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2017, 129: 1-12.
- [67] Rao V B, Hada K, Herdies D L. On the severe drought of 1993 in north-east Brazil [J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(6): 697-704.
- [68] Foltz G R, McPhaden M J, Lumpkin R. A strong Atlantic Meridional Mode Event in 2009: The role of Mixed Layer dynamics [J]. *Journal of Climate*, 2011, 25(1): 363-380.
- [69] Folland C K, Palmer T N, Parker D E. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-85 [J]. *Nature*, 1986, 320(6 063): 602-607.
- [70] Lamb P J, Peppler R A. Further case studies of Tropical Atlantic surface atmospheric and oceanic patterns associated with Sub-Saharan Drought [J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(5): 476-488.
- [71] Miles M K, Folland C K. Changes in the latitude of the climatic zones of the Northern Hemisphere [J]. *Nature*, 1974, 252(5 484): 616.
- [72] Yu K, Xie Shangping. The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(9): 669-673.
- [73] Holland P R, Kwok R. Wind-driven trends in Antarctic sea-ice drift [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(12): 872-875.
- [74] Turner J, Comiso J. Solve Antarctica's sea-ice puzzle [J]. *Nature*, 2017, 547(7 663): 275.
- [75] Li Xichen, Holland D M, Gerber E P, et al. Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice [J]. *Nature*, 2014, 505(7 484): 538-542.
- [76] Li Xichen, Gerber E P, Holland D M, et al. A Rossby Wave Bridge from the Tropical Atlantic to West Antarctica [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(6): 2 256-2 273.
- [77] Zheng Xiaotong, Xie Shangping, Du Yan, et al. Indian Ocean Dipole response to global warming in the CMIP5 multimodel Ensemble [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(16): 6 067-6 080.
- [78] Weller E, Cai Wenju, Cowan T. Realism of the Indian Ocean Dipole in CMIP5 models, and the implication for climate projections [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(17): 6 649-6 659.
- [79] Xu Kang, Tam C Y. CMIP5 projections of two types of El Niño and their related tropical precipitation [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(3): 849-864.
- [80] Ferrett S, Collins M. Diagnosing relationships between mean state biases and El Niño shortwave feedback in CMIP5 Models [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31: 1 315-1 335.
- [81] Yang Yun, Xie Shangping, Wu Lixin, et al. Causes of enhanced SST variability over the equatorial atlantic and its relationship to

- the Atlantic Zonal Mode in CMIP5 [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(16):6 171-6 182.
- [82] Liu Hailong, Wang Chunzai, Lee S K, et al. Atlantic Warm Pool Variability in the CMIP5 simulations [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15):5 315-5 336.
- [83] Chang C Y, Carton J A, Grodsky S A, et al. Seasonal climate of the Tropical Atlantic Sector in the NCAR community climate system Model 3: Error structure and probable causes of errors [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(6):1 053-1 070.
- [84] Richter I, Xie Shangping. On the origin of equatorial Atlantic biases in coupled general circulation models [J]. *Climate Dynamics*, 2008, 31(5):587-598.
- [85] Tozuka T, Doi T, Miyasaka T, et al. Key factors in simulating the equatorial Atlantic zonal sea surface temperature gradient in a coupled general circulation model [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2011, 116(C6):C06010. DOI: 10.1029/2010JC00671.
- [86] Richter I, Xie Shangping, Wittenberg A T, et al. Tropical Atlantic biases and their relation to surface wind stress and terrestrial precipitation [J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(5):985-1 001.
- [87] Richter I, Behera S K, Masumoto Y, et al. Multiple causes of interannual sea surface temperature variability in the equatorial Atlantic Ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 6(1):43-47.
- [88] Stockdale T N, Balmaseda M A, Vidard A. Tropical Atlantic SST prediction with Coupled Ocean Atmosphere GCMs [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(23):6 047.
- [89] Davey M, Huddleston M, Sperber K, et al. STOIC: A study of coupled model climatology and variability in tropical ocean regions [J]. *Climate Dynamics*, 2002, 18(5):403-420.
- [90] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(3):163-172.
- [91] Nnamchi H C, Li J, Kucharski F, et al. Thermodynamic controls of the Atlantic Niño [J]. *Nature Communications*, 2015, 6.DOI: 10.1038/ncomms9895.
- [92] Nnamchi H C, Li J, Kucharski F, et al. An equatorial-extratropical dipole structure of the Atlantic Niño [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(20):7 295-7 311.
- [93] Richter I, Xie Shangping, Behera S K, et al. Equatorial Atlantic variability and its relation to mean state biases in CMIP5 [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(1/2):171-188.

Progresses and Prospects for North Tropical Atlantic Mode Interannual Variability^{*}

Yang Yun, Li Jianping, Xie Fei, Feng Juan, Sun Cheng

(College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: North Tropical Atlantic Mode (NTAM) is the leading variability of the boreal spring sea surface temperature anomalies over the North Tropical Atlantic at interannual timescale. It is also known as the northern pole of the Atlantic Meridional Mode (AMM). NTAM shows significant impact on the shift of Intertropical Convergence Zone, the precipitation of the surrounding countries, the quasi-biennial oscillation of El Niño-Southern Oscillation (ENSO), and the recent global warming hiatus. Despite its distinct influence on global climate, NTAM has not received equivalent attention as other tropical variability (e.g. ENSO). By revisiting previous studies, this paper summarized the triggers and mechanisms responsible for the evolution and development of NTAM, including remote forcing from ENSO, south tropical Atlantic as well as North Atlantic Oscillation (NAO), local air-sea coupling, and the interactions among different triggers. Also, this paper detailedly introduced the ability of CMIP5 (The fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project) model simulation. The prominent model biases over the equatorial Atlantic significantly limit the study of NTAM. Finally, a future prospective of NTAM interannual variability was presented.

Key words: North Tropical Atlantic Mode; Interannual variability; Ocean-atmosphere interaction.

* **Foundation item:** Project supported by the National Key Research and Development Program of China “Research on the global warming hiatus: The impact of ocean dynamics to heat redistribution” (No.2016YFA0601803); The National Natural Science Foundation of China “Indian Ocean Dipole decadal variability: ENSO forcing and internal variability” (No.41606008).

First author: Yang Yun (1988-), female, Anshan City, Liaoning Province, Lecturer. Research areas include ocean-atmosphere interaction and climate change. **E-mail:** yunyang@bnu.edu.cn