

## 2016与1998年春季北大西洋海表温度异常的差异及成因

薛文璟, 余锦华, 陈林

南京信息工程大学, 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, 江苏 南京 210044

**摘要:** 利用再分析资料以及混合层海温诊断方程, 研究1997—1998与2015—2016年超级厄尔尼诺次年北大西洋海表温度异常(sea surface temperature anomalies, SSTA)的差异及成因。结果显示, 北大西洋 SSTA 在1998年春季呈明显正负正三极型式分布, 而在2016年呈弱的负正负型态。诊断热带北大西洋 SSTA 的影响因素表明, 1998年春季暖 SSTA 除了之前研究强调的海洋表面向大气的潜热输送异常减少, 以及吸收太阳辐射的增加外, 海洋动力过程即 Ekman 纬向漂流也起着重要的作用。热力过程与厄尔尼诺峰值后出现的北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)负位相有关, 其可引起亚速尔高压减弱, 产生西南风异常, 通过风-蒸发-海表温度(sea surface temperature, SST)反馈机制使热带北大西洋蒸发减弱, 海表增暖, 沃克环流下沉支的东移对这一增暖也有贡献。与1997—1998厄尔尼诺事件不同, 2015—2016厄尔尼诺事件没有强迫出负位相NAO, 而是出现弱NAO正位相, 热带北大西洋为弱的东风异常, 使海表发生一定的冷却, 形成2016年春季北大西洋 SSTA 与1998年的明显差异。

**关键词:** 北大西洋海表温度异常; 厄尔尼诺衰减位相; 大气遥响应; NAO 位相

中图分类号: P731.11; P732.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2020)03-0019-12

## Differences of sea surface temperature anomalies in the North Atlantic in springs of 1998 and 2016 and their causes

XUE Wenjing, YU Jinhua, CHEN Lin

Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology/  
Collaborative Innovation Center for Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044, China

**Abstract:** In this paper, we use reanalysis data and mixed layer temperature (MLT) budget analysis to study the differences of the North Atlantic sea surface temperature anomalies (SSTAs) between two Super El Niño (1997-1998 and 2015-2016) events and the causes for the differences. The results show that in the spring of 1998 the North Atlantic SSTA had clear positive, negative and positive distribution, while in spring 2016 it presented weakly negative, positive and negative distribution. The diagnostic results of factors influencing the SSTA in the tropical North Atlantic indicate that in the spring of 1998, in addition to the reduction of latent heat transferring from ocean surface to atmosphere and the increase in solar radiation absorption, the marine dynamic process, i.e., zonal Ekman drift, also played an important role. The thermal process was related to the negative phase of the North Atlantic Oscillation (NAO) that occurred after the peak of El Niño, which caused the Azores high pressure to weaken and generated southwesterly wind anomaly. The evaporation of the tropical North Atlantic was attenuated by the wind-evaporation-SST feedback mechanism. The eastward shift of the Walker circulation sinking branch also contributed to this warming. Different from the 1997-1998 El Niño event, the 2015-2016 El

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-11-13。林强编辑

基金项目: 国家自然科学基金(41575083、41730961)

作者简介: 薛文璟(1995—), 女, 江苏省扬州市人, 硕士研究生, 研究方向为海气相互作用。E-mail: 20171201116@nuist.edu.cn

通信作者: 余锦华。E-mail: jhyu@nuist.edu.cn

Received date: 2019-09-09; Revised date: 2019-11-13. Editor: LIN Qiang

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41575083, 41730961)

Corresponding author: YU Jinhua. E-mail: jhyu@nuist.edu.cn

Niño event caused a weakly positive NAO phase instead of a negative one. The weak easterly anomaly in the tropical North Atlantic caused SST cooling; this may be the main reason for the significant difference between the North Atlantic SSTAs in the springs of 1998 and 2016.

**Key words:** North Atlantic SSTA; El Niño decay phase; atmospheric teleconnection; NAO phase

北半球向北的大部分的热量输送发生在大西洋海盆(Talley, 1984)。北大西洋的海温异常可影响北半球大气行星尺度环流, 从而影响东亚气候, 对中国气候的变化存在直接或者间接的影响。研究表明, 北大西洋海表温度异常(sea surface temperature anomalies, SSTA)的主导模态为三极型结构(Bjerknes, 1964; Kushnir, 1994; Wu et al, 2010; 李刚等, 2015; 任昌宏等, 2018), 是与北大西洋涛动(North Atlantic oscillation, NAO)耦合的结果(Cayan, 1992; Delworth, 1996; Delworth et al, 2000), NAO可通过改变海表面风场, 引起海气热通量变化而影响SSTA(Bjerknes, 1964; Cayan, 1992; Halliwell, 1998)。

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是气候系统最显著的年际变化信号。ENSO通过大气桥、遥相关等引起热带北大西洋SSTA的变化已有很多的研究结果(Bjerknes, 1969; 李晓燕等, 2000; 杜美芳等, 2015)。统计分析显示, ENSO指数与滞后3~4个月的热带北大西洋SSTA有最显著的正相关, 表明在厄尔尼诺事件于冬季达到峰值后的次年春季, 容易出现热带北大西洋增暖(Curtis et al, 1995; Enfield et al, 1997; Klein et al, 1999; Saravanan et al, 2000)。目前, 已提出几个遥相关动力学机理解释厄尔尼诺如何引起热带北大西洋SST增暖, 包括厄尔尼诺强迫的北太平洋-北美遥相关型(Pacific-Northern American pattern, PNA)(Horel et al, 1981; Chiang et al, 2002)、直接的大气桥作用(即Walker环流引起北大西洋Hadley环流的改变)(Wang, 2004)、Kelvin波东传的对流层增暖(Horel et al, 1981; Chiang et al, 2002)以及最近提出的与Walker环流变化相关的Gill式遥响应机理(Gill, 1980; Wang, 2004; Lee et al, 2009)。这些机理主要用于解释厄尔尼诺衰减位相的春季, 热带北大西洋的东北信风如何减弱, 通过风-蒸发-海表温度(sea surface temperature, SST)反馈机制, 减少海洋表面的潜热输送, 入射太阳短波辐射增强, 使SST发生增暖(Carton et al, 1996; Enfield et al, 1997)。

1997—1998年和2015—2016年均均为超级厄尔尼诺事件, 但是次年的春夏季节, 北大西洋海温却有着较大的差异, 即1998年呈现出显著正三极型

SSTA型(热带和中高纬是正SSTA, 负热带地区为负SSTA), 与通常的认识相一致, 而2016年为相对较弱的负三极型SSTA, 春季热带北大西洋没有发生增暖现象。已有研究表明这两年的SSTA差异影响着夏季欧亚中高纬度的环流变率, 对西北太平洋对流层异常反气旋起着调制作用不同(薛峰等, 2018), 为什么这两个超级厄尔尼诺事件次年北大西洋海温会出现显著差异? 这值得进一步探讨。

影响SSTA的变化因子主要有表面风应力, 热通量等大气强迫, 以及海洋内部过程的水平洋流、垂直混合等(刘珊等, 2013)。以往的研究大多强调风-蒸发-SST反馈作用是厄尔尼诺引起热带北大西洋增暖的主要过程, 其次是太阳短波辐射增强(García-Serrano et al, 2017), 除此以外, 海洋内部过程的作用又如何? 针对上述两个关键科学问题, 本文将通过遥相关分析和混合层海温诊断方程, 研究两个超级厄尔尼诺事件次年, 热带北大西洋春季SSTA形成差异的可能成因, 定量诊断影响春季热带北大西洋SSTA的主要物理因素, 深入认识海洋内部过程的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料说明

月平均海表温度资料取自于Hadley中心, 该资料的网格分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。大气环流、位势高度等压面、对流层温度数据来自NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)逐月再分析数据集, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ; 海洋混合层数据来自NCEP/NCAR月平均资料, 空间分辨率为 $0.333^{\circ} \times 0.997^{\circ}$ ; 表面热通量数据及总云量来自ERA5再分析月资料, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。气候态时段为1981—2010年。

### 1.2 方法简介

用Niño3.4指数( $5^{\circ}\text{S}$ — $5^{\circ}\text{N}$ 和 $170^{\circ}$ — $120^{\circ}\text{W}$ )来表征厄尔尼诺事件。北大西洋三极SSTA指数NATI(Wu et al, 2010), 按照下式计算:  $(S+N)/2-M$ 。S、N和M分别代表三个区域( $10^{\circ}$ — $25^{\circ}\text{N}$ ,  $50^{\circ}$ — $15^{\circ}\text{W}$ ;  $40^{\circ}$ — $55^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}$ — $40^{\circ}\text{W}$ ;  $25^{\circ}$ — $35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}$ — $60^{\circ}\text{W}$ )的平均SSTA。具体区域的选择, 基于海温异常变化中

心位置以及湾流作用(Czaja et al, 2001)。副热带区域几乎与“风暴形成区域”重合(Sutton et al, 1997), 因此我们将北大西洋热带区域出现的正 SSTA 中心的模态定义为三极型的正位相。混合层诊断方程 MLT (Li et al, 2002; Su et al, 2010)可写为

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = -(\bar{V}' \cdot \nabla \bar{T} + \bar{V} \cdot \nabla T') - (\bar{V}' \cdot \nabla T') + \frac{Q'_{net}}{\rho C_p H} + R \quad (1)$$

其中  $\bar{V} = (u, v, w)$  表示三维海洋环流速度;  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ , 表示三维梯度算子; 上标“'”表示异常值(本文使用的为月尺度); 上标“ $\bar{\quad}$ ”代表气候态,  $-(\bar{V}' \cdot \nabla \bar{T} + \bar{V} \cdot \nabla T')$  是线性温度环流项的总和,  $-(\bar{V}' \cdot \nabla T')$  是非线性温度环流项;  $Q'_{net}$  表示海洋表面的净热通量, 即净短波辐射, 净长波辐射, 潜热通量和显热通量的总和, 向下为正, 向上为负;  $\rho$  为海水密度, 取  $1013 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_p$  为海水比热, 取  $4000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $R$  表示剩余项,  $H$  是混合层深度, 取常数 55m。

## 2 结果

### 2.1 1998 和 2016 北大西洋 SSTA 时空特征对比

图 1 是 1997—1998 和 2015—2016 年 Niño3.4 指数异常与 NATI 在厄尔尼诺事件的演变。可见, 两个超级厄尔尼诺事件 Niño3.4 指数从发展到衰减过程很相似, 峰值分别达到了 2.40 与 2.45, 且同时出现于发展年的 12 月份。峰值后的衰减也比较相近, 次年的 5 月到 6 月, Niño3.4 指数从正异常转为负异常。北大西洋三极型海温指数的变化差异很大。由图 1a 可见, 1997—1998 厄尔尼诺事件从其发展到衰减, 北大西洋三极型基本呈现出正位相特征, 很明显, 厄尔尼诺峰值后, NATI 数值增大, 到次年的春季 3 月达到峰值后有所减小, 直到 7 月后开始迅速减小。图 1b 显示 2015—2016 年厄尔尼诺事件从其发展到衰减, 北大西洋的三极型 SSTA 海温一直呈现负位相状态, 厄尔尼诺峰值后的春季 NATI 维持负值, 变化很小。由此可见, 在 2015—2016 和 1997—1998 两个超级厄尔尼诺事件过程, 北大西洋

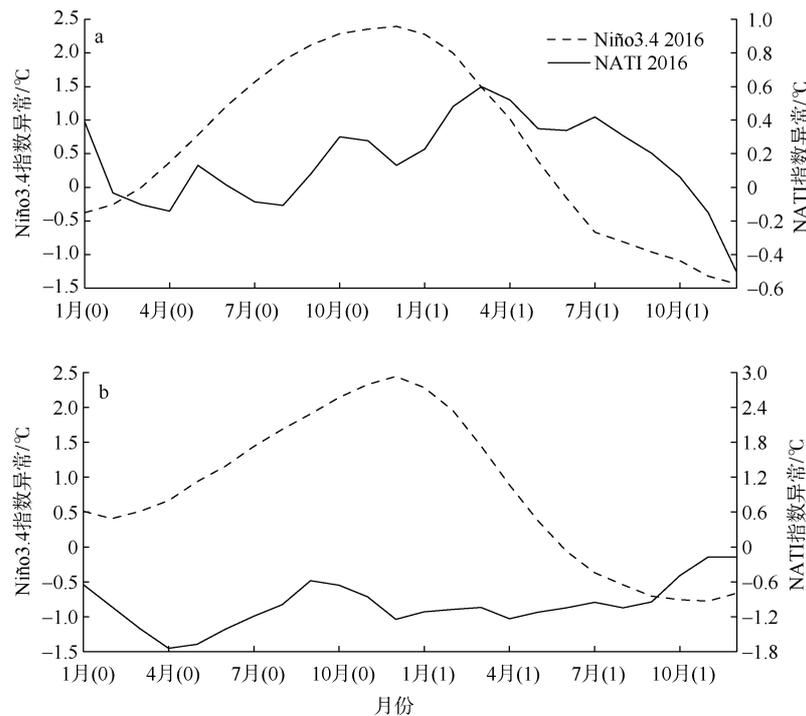


图 1 1997—1998 (a)和 2015—2016 (b)厄尔尼诺事件的 Niño3.4(5°S—5°N, 170°—120°W)异常指数及北大西洋三极型异常指数的演变

月份后的 0 表示发展年份, 1 表示衰减年份

Fig. 1 Anomalous Niño 3.4 (170°–120°W, 5°S–5°N) index (dotted line, left axis), anomalous North Atlantic tripole mode index (solid line, right axis) evolution during El Niño events of 1997-1998 (a) and 2015-2016 (b). The number 0 represents a developing year, and 1 represents a decaying year

SSTA 表现出相反的分型态, 即使厄尔尼诺强度相近, 北大西洋 SSTA 的响应却表现出明显的差异。

从发展年的夏季至衰减年夏季, 各个季节的 SSTA 和 850hPa 环流异常场的空间分布(图 2)显示, 这两次厄尔尼诺事件中, 赤道东太平洋均在发展年的夏季出现明显的正 SSTA, 增暖持续到冬季, 伴随着赤道东太平洋 850hPa 风异常辐合, 与深对流的异常东移和 Walker 环流的上升分支一致, 春季开始逐渐衰减, 伴随着海温的冷却, 风场的辐合也减弱,

到次年夏季, 赤道附近都出现了负的海温异常。虽然前期两次过程的发展较为相近, 但是对比两次过程的衰减阶段, 在空间上有着一些差别, 1998 年春季赤道太平洋东部依旧保持较高的正异常, 且有较强的东风异常; 2016 的海温正异常在赤道东太平洋地区的衰减较快, 春季的太平洋东部正异常已经达到  $1^{\circ}\text{C}$  以下, 而 1998 年太平洋东部的同期海温异常中心仍保持在  $2^{\circ}\text{C}$  以上, 这主要与赤道东太平洋海域持续的东风异常以及纬向平流较弱有关(郑依玲等,

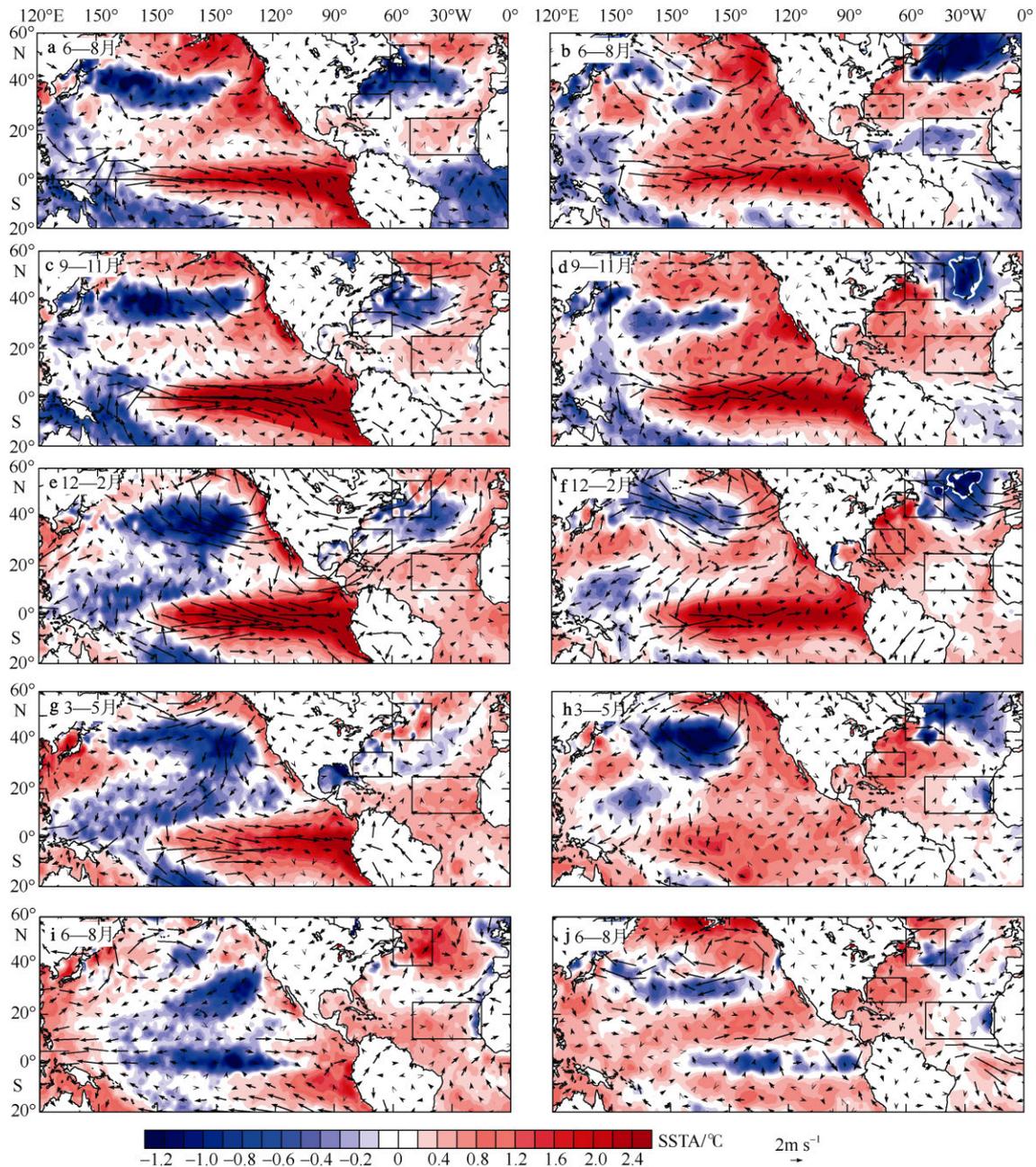


图 2 厄尔尼诺发展阶段(a—d)、峰值阶段(e、f)和衰减阶段(g—j)的 850hPa 风异常及 SSTA 分布

方框分别代表北大西洋三极指数 NATI 的三个区域; a、c、e、g、i 为 1997—1998 厄尔尼诺事件; b、d、f、h、j 为 2015—2016 事件

Fig. 2 SSTA (shading) and anomalous wind vector at 850 hPa during the developing phase in June-August (a, b) and September-November (c, d), the peak phase in December-February (e, f), and the El Niño decaying phase in March-May (g, h) and June-August (i, j) for 1997-1998 (left panels) and 2015-2016 (right panels)

2019), 在赤道中太平洋维持一相对较强的中心, 同时伴随着 850hPa 较弱的辐合风。北大西洋 SSTA 在 1997—1998 年与 2015—2016 年表现出相反的三极型特征, 1998 年的热带北大西洋暖 SSTA 在春季最强, 这与以往研究给出的 ENSO 与热带北大西洋 SSTA 的联系相一致。对比北大西洋对流层低层大气环流异常对 2015—2016 年与 1997—1998 年厄尔尼诺事件的响应, 可以发现, 最明显的差异发生在热带外地区, 1997—1998 年的中纬度地区低层为气旋性环流异常, 2015—2016 年中纬度为反气旋环流异常, 北大西洋 SSTA 在这两次厄尔尼诺事件表现出相反的特征与这两年的相反的环流异常有关, 后面将做进一步分析。

## 2.2 1998 与 2016 年 3 月北大西洋 SSTA 变化的定量诊断

海温的变化是由表面热通量和三维海洋温度环流变化共同引起的结果(Li et al, 2002; Su et al, 2010)。我们重点分析春季的第一个月份, 即 3 月份 SSTA 的变化。选取的诊断区域为  $10^{\circ}$ — $25^{\circ}$ N,  $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W, 该区域主要为春季热带地区 SSTA 异常值的中心区, 也与三极指数热带区域相一致。

图 3 显示了 3 月相对于 1 月热带北大西洋 ( $10^{\circ}$ — $25^{\circ}$ N,  $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W) SSTA 的变化。1998 年的温度趋势为  $0.275^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}^{-1}$ , 2016 年为  $-0.037^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}^{-1}$ 。可见, 1998 年 3 月 SSTA 的变化来自大气热力过程 ( $0.283^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}^{-1}$ ) 和海洋动力过程 ( $0.171^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}^{-1}$ ) 的共同作用, 虽然热力作用强于动力作用, 但后者的影响不可忽视。同时, 图 3 显示, 单一的热力作用要大于方程左侧的 SSTA 变化, 即剩余项较大, 可能与资料时空分辨率较粗有关。这儿我们主要想强调动力过程的影响。2016 年小的负 SSTA 变化主要是热力作用所致。

图 4 给出了热力过程各项的作用大小, 重点看一下 1998 的结果(蓝色柱)。其中动力线性作用项  $-(\vec{V}'\cdot\nabla\bar{T} + \vec{V}\cdot\nabla T')$ , 可以写作  $-(u'\partial\bar{T}/\partial x + \bar{u}\partial T'/\partial x)$ 、 $-(v'\partial\bar{T}/\partial y + \bar{v}\partial T'/\partial y)$  与  $-(w'\partial\bar{T}/\partial z + \bar{w}\partial T'/\partial z)$  的和, 分别对应图 4 中的纬向环流项、经向环流项、垂直对流项。可见, 海洋动力过程以纬向环流的作用为主, 纬向海流扰动与平均纬向温度梯度项 ( $0.142^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}^{-1}$ ) 影响最大, 占纬向环流项的 69%, 这与热带混合层有向东的环流异常  $u' > 0$  且在大西洋 ( $80^{\circ}\text{W}$ — $0^{\circ}$ ) 的范围内, 平均混合层温度西高东低, 即平均纬向温度梯度  $-\partial\bar{T}/\partial x > 0$  有关, 平均纬向海流对纬向扰动

热量输送的作用占纬向环流作用的 31%。热力作用可以分为表面的长波辐射、短波辐射、潜热通量与感热通量四项。其中潜热通量项的贡献最大, 达到  $0.227^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}^{-1}$ , 短波辐射项为  $0.047^{\circ}\text{C}\cdot\text{month}^{-1}$ 。2016 年, 短波辐射, 潜热通量对负 SSTA 有正向作用, 而长波辐射和显热通量不利于海温的降低, 导致 1998 年和 2016 年 SSTA 之间差异的热力因素是潜热通量和短波辐射过程。

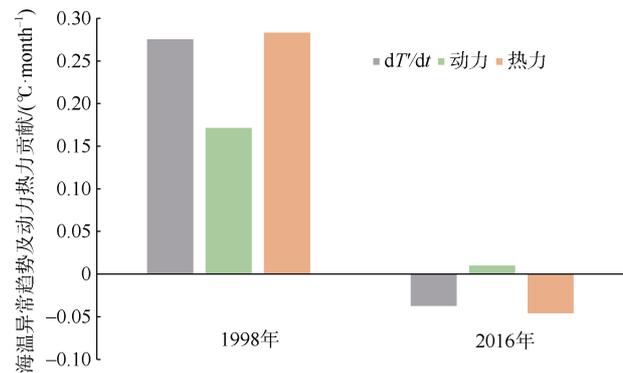


图 3 海洋动力过程(绿色)和热力过程(橘色)对 1998 和 2016 年 3 月与 1 月热带北大西洋 ( $10^{\circ}$ — $25^{\circ}$ N,  $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W) 区域平均海洋混合层海温异常变化(灰色)的贡献

Fig. 3 Ocean dynamic process (green) and thermal process (orange) contributions for the change of regionally-averaged ocean mixed layer SSTA (gray) in the tropical North Atlantic ( $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W,  $10^{\circ}$ — $25^{\circ}$ N) in January-March of 1998 and 2016

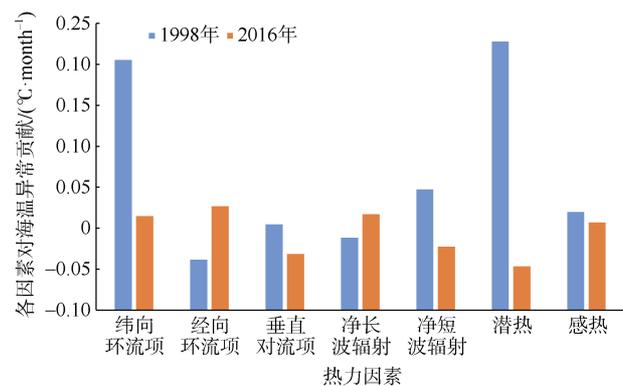


图 4 1998 和 2016 年各因素对热带北大西洋 ( $10^{\circ}$ — $25^{\circ}$ N,  $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W) 区域平均的 3 月与 1 月海洋混合层海温异常变化的贡献

Fig. 4 All terms contributions of 1998 (blue) and 2016 (orange) for the change of regional-average ocean mixed layer SSTA in the tropical North Atlantic ( $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W,  $10^{\circ}$ — $25^{\circ}$ N) from January to March

## 2.3 1998 与 2016 年北大西洋春季 SSTA 变化的物理量对比

2016 与 1998 年引起 SSTA 差异的潜热通量与短

波辐射异常具有显著的差异。图 5a 显示, 1998 年 SSTA 中心出现在春季的  $10^{\circ}$ — $20^{\circ}$ N, 热带地区的信号从二月开始到春季都有较大的异常值, 西风异常发生在 El Niño 峰值后的 1—3 月,  $10^{\circ}$ — $20^{\circ}$ N 经向区域, 即风速异常发生在海面增暖前的 1—2 两个月,

信风减弱, 蒸发减少, 海洋向大气的潜热输送减少, SST 上升。图 5b 中, 2016 年海温形态呈现与 1997—1998 相反的变化, 主要负异常中心也出现在衰减年的春季  $10^{\circ}$ — $20^{\circ}$ N, 4 月达到最大值。海面东风异常出现在 El Niño 峰值后的 1—3 月的  $10^{\circ}$ — $30^{\circ}$ N 范围内。

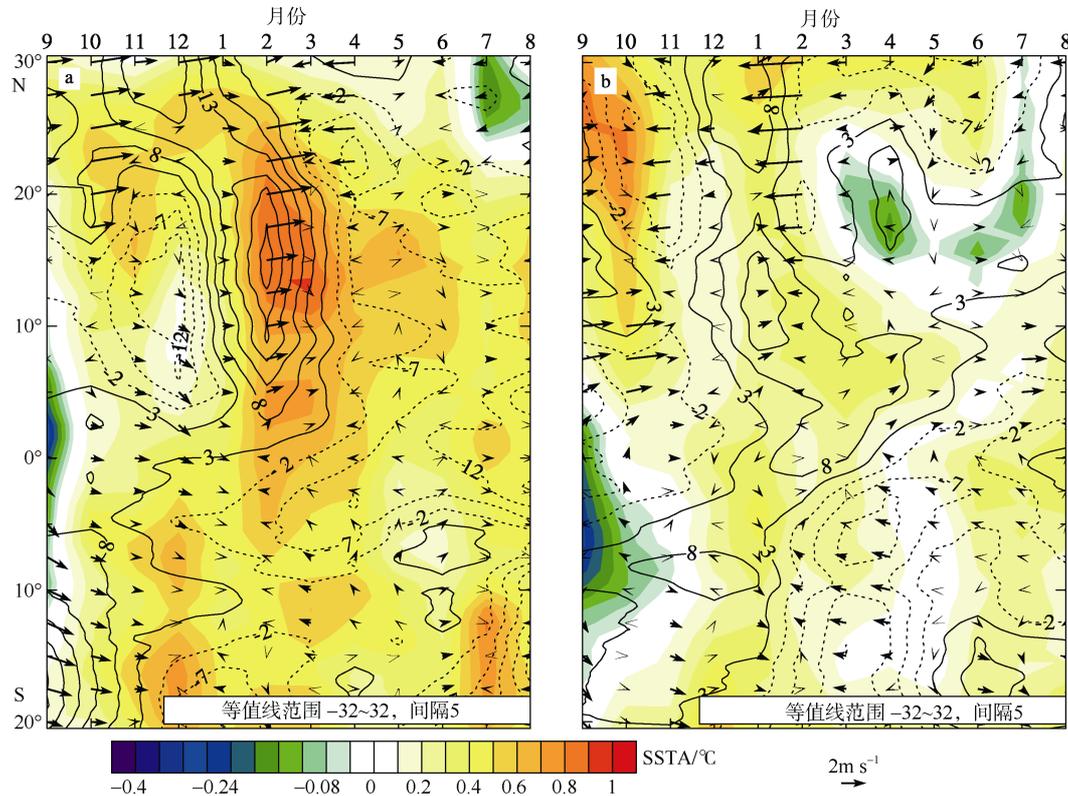


图 5 厄尔尼诺发展阶段(9 月)至衰减阶段(8 月)期间热带北大西洋海域的表面风异常和潜热通量异常(等值线, 单位:  $\text{W}\cdot\text{M}^{-2}$ , 热量以向海洋输送为正)及 SSTA 经向时间剖面结构

各量均为热带北大西洋( $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W)的区域平均, 等值线实线为正值, 虚线为负值; a 为 1997—1998 年; b 为 2015—2016 年

Fig. 5 Meridional time section structure of the tropical North Atlantic surface wind anomaly (arrow; units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), latent heat flux anomaly (contour; units:  $\text{W}\cdot\text{M}^{-2}$ , downward is positive), SSTA (shading; units:  $^{\circ}\text{C}$ ) from September in El Niño developing phase to August in El Niño decaying phase. All data are regionally-averaged in the tropical North Atlantic ( $50^{\circ}$ — $15^{\circ}$ W). The solid line is positive and the dashed line is negative. a) 1997-1998; b) 2015-2016

图 6 为热带北大西洋海域海表潜热通量和吸收的太阳短波辐射异常的分布, 所有的通量均以向下为正, 向上为负。图 6a 显示, 1998 年 2 月整个热带北大西洋海域, 潜热通量为正异常, 中心值大于  $60\text{W}\cdot\text{M}^{-2}$ , 表示海面向大气的潜热输送明显减小, 这与前面诊断的该项作用是引起热带北大西洋春季增暖最主要的因素相一致。2016 年 2 月, 潜热通量在热带北大西洋西侧为正异常(图 6b), 中东部为负异常, 平均为负异常, 引起区域平均 SSTA 为负。图 6c、d 分别为 1998 年和 2016 年 2 月北大西洋海表面的短波辐射通量异常分布, 与诊断结果一致, 1998 年吸收的太阳短波辐射在整个热带北大西洋海域增加, 对该年春季 SSTA 增暖有贡献。2016 年相

反, 热带北大西洋吸收的太阳辐射减小, 对负 SSTA 有贡献。云量对短波辐射有着直接影响, 从图 6 中可以看到, 1998 年的总云量为较大的负异常(图 6a), 覆盖云量的减少导致海表面的向下的短波辐射的增加, 从而引起海温的升高, 2016 年则相反。

#### 2.4 两次厄尔尼诺事件的北大西洋遥响应特征

Amaya 等(2014)认为厄尔尼诺现象对北大西洋热带影响的主要机制为中纬度北太平洋-北美遥相关型(PNA)的间接影响以及更为直接的赤道地区大气开尔文波的响应。从上面的分析可见, 厄尔尼诺峰值后的 1—3 月海面风场的异常变化是影响春季 SSTA 变化的主要因素, 我们将重点分析 1—3 月北大西洋对两次厄尔尼诺事件遥响应的差异。图 7a 显

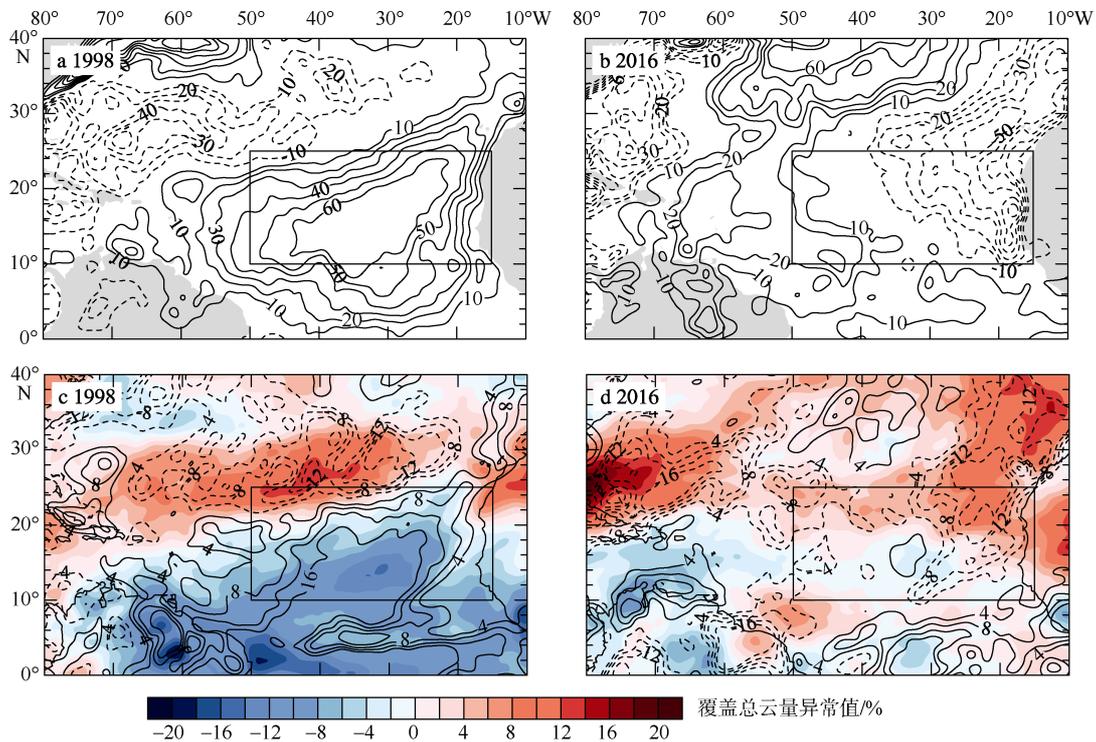


图 6 热带北大西洋在 2 月份表面潜热通量异常(a, b, 单位:  $W \cdot M^{-2}$ )、表面净短波辐射异常(c, d, 等值线, 单位:  $W \cdot M^{-2}$ )和 1—3 月覆盖总云量的异常值(c, d, 阴影, 单位: %)的空间分布

等值线实线为正值, 虚线为负值; a、b 的等值线间隔为 10, c、d 的等值线间隔为 4; 方框为热带诊断区; a、c 为 1997—1998 厄尔尼诺事件; b、d 为 2015—2016 事件

Fig. 6 Spatial distributions of tropical North Atlantic surface latent heat flux anomaly (a, b; units:  $W \cdot M^{-2}$ ), net surface shortwave radiation anomaly (c, d; units:  $W \cdot M^{-2}$ ) in February and the anomalous total cloud cover (c, d; shading, units: %) in January-March in El Niño developing years. The solid line is positive and the dashed line is negative, Contour lines range from -60 to 60 with an interval of 10 (a, b) and range from -16 to 16 with an interval of 4 (c, d); Boxes are tropical diagnostic area. (a, c) are for 1998, and (b, d) are for 2016

示, 1998 年 1—3 月从热带太平洋到北美表现为典型的正-负-正位势高度异常的 PNA 波列, 这是厄尔尼诺强迫的 Rossby 波经向传播的结果。北太平洋、美国东南部和副热带北大西洋出现负位势高度异常中心, 且中心值向东衰减。在北大西洋和西欧上方表现出了负 NAO 式的大气响应, 即亚速尔高压减弱, 热带北大西洋产生西风异常, 减弱东北信风, 海洋异常增暖。2016 年(图 7b)的大气环流的响应也表现为典型的 PNA 波列, 但在美国东南部的位势高度负异常弱于 1998 年, 该负异常没有像 1998 年那样传播到副热带北大西洋, 热带外北大西洋没有形成负 NAO 式的大气环流异常。三极型模是北大西洋最常出现的 SSTA 分布(Yu et al, 2016), 且与 NAO 负位相耦合作用有关(Czaja et al, 2001)。我们认为, NAO 的不同位相可能是引起 2016 年与 1998 年北大西洋 SSTA 差异的重要原因。

开尔文波的驱动源自对流层大气的潜热释放,

这两年的对流层温度异常的信号可以从图 7 中看到。图 7a 显示, 1998 年, 异常对流层温度从赤道延伸至  $30^{\circ}N$  左右, 中心的强度达到了  $2.4^{\circ}C$  以上。开尔文波加强, 导致西北热带北大西洋形成静态斜压 Rossby 波(Chiang et al, 2002), 这将导致美国东南部负位势高度异常的加强。暖 Kelvin 波从热带东太平洋传播到热带大西洋, 异常值达到了  $1.6^{\circ}C$ , 对流层温度升高, 导致大气的静力稳定度增加, 对流减少, 云量减少, 引起入射太阳辐射增加(图 6c)。同时气温升高, 水汽增加, 使大气垂直方向的湿度梯度减小, 对海洋向大气的潜热输送减少(图 6a)也有贡献。2016 年(图 7b)对流层温度正异常也从赤道延伸至北纬  $30^{\circ}N$  以南的地区, 但中心的强度低于  $2.4^{\circ}C$ 。暖 Kelvin 从热带太平洋向东传播到热带大西洋的中部, 因此, 对流层增暖的强度小于 1998 年, 东部为小的冷异常。

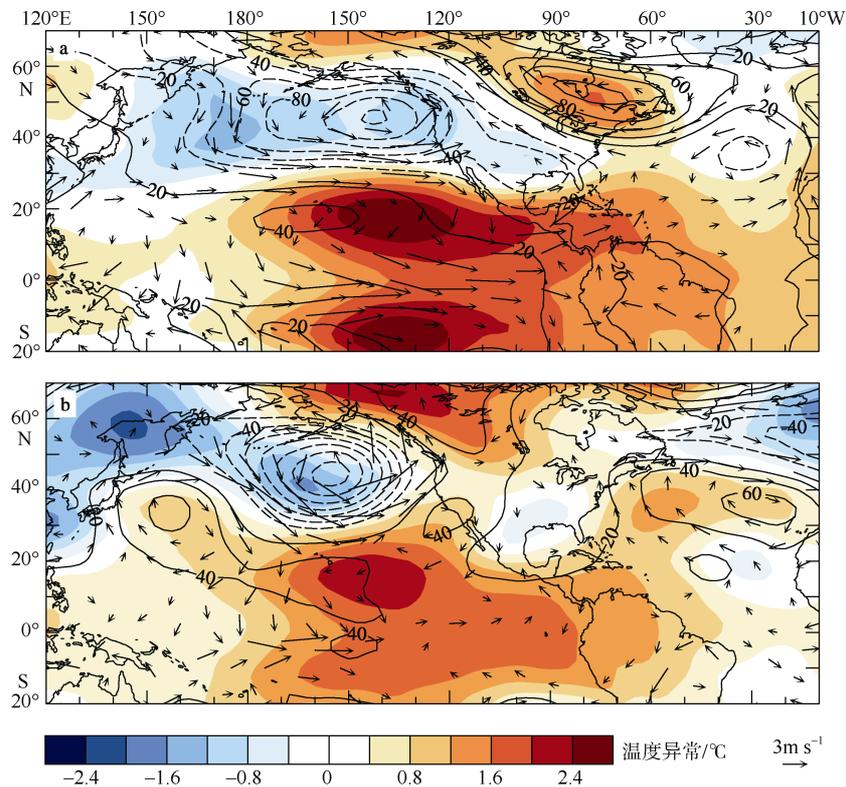


图7 厄尔尼诺衰减年1—3月太平洋、大西洋区域500hPa的位势高度异常(等值线, 单位: gpm), 对流层温度异常(阴影)和850 hPa风异常(箭头)的空间分布

等值线实线为正值, 虚线为负值, a. 1998年; b. 2016

Fig. 7 Spatial distributions of Pacific and Atlantic anomalous geopotential height at 500 hPa (contour; units: gpm), anomalous tropospheric temperature (shading; units:  $^{\circ}\text{C}$ ) and anomalous wind vector at 850 hPa (arrow; units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in January-March in El Niño developing years. The solid line is positive and the dashed line is negative. a) 1998; b) 2016

在以前的研究中, 副热带急流被认为是连接 ENSO 和北大西洋大气的重要桥梁(Graf et al, 2012), 因此我们给出 300hPa 的纬向风异常来进一步解释为什么 2016 年与 1998 年 El Niño 峰值后北大西洋 NAO 的位相相反。1—3 月是对流层高层副热带西风急流较强的季节, 急流中心位于  $30^{\circ}\text{N}$  附近(图 8 等值线)。1998 年, 强的西风异常中心分别位于东亚副热带急流中心的东侧和美国南部(图 8a)。图 7a 显示的北美南部的负异常位势高度中心和副热带北大西洋的负异常位势高度中心没有连在一起, 它们分别是波动中心, 其实在  $35^{\circ}\text{N}$  纬带上有 5 个负位势高度异常中心, 类似于环状模。El Niño 潜热释放激发经向传播的 Rossby 波, 急流的波导作用可截获部分能量, 从北太平洋东部向东传播, 使得美国南部和副热带北大西洋产生负异常位势高度, 后者的中心值小于前者(图 7a)。通过 T-N 波通量在两个衰减年差异的定量诊断, 也可以发现 2016 年与 1998 年波列传播的差异。1998 年在  $30^{\circ}\text{N}$  附近, 从西经  $130^{\circ}\text{W}$  到  $20^{\circ}\text{W}$ , T-N 波通量有较强向东传播的异常(图略), 有利于北太平洋中部的位势扰动向向东传播, 形成

美国南部和副热带北大西洋的负位势高度异常中心。2016 年, 位于东亚急流中心东侧和美国南部的西风异常都弱于 1998 年(对比图 8b 与图 8a), 副热带纬向 T-N 通量弱于 1998 年(图略), 证实了 Rossby 能量向东传播较弱, 导致美国南部的负位势高度异常小于 1998 年。北大西洋副热带为正位势高度异常, 与对流层增暖有关。

北大西洋上空所形成的 NAO 不只限于 ENSO 事件的影响, 由前人的研究得知, ENSO 与 NAO 之间的关系, 不能用线性关系简单描述。有学者认为 ENSO 与 NAO 的发生概率是随机(Ropelewski et al, 1987; Trenberth et al, 2000; Brönnimann, 2007), 也有研究认为厄尔尼诺现象常伴随着大西洋的负 NAO(Gouirand et al, 2003; Zhang et al, 2019), 但是 ENSO 事件对 NAO 影响的不确定性还包括着其他的条件, 如大西洋局地的大气环流变化, 1997-1998 厄尔尼诺发展阶段的秋季, 北大西洋呈现负 NAO 式的大气环流异常, 2015—2016 为正 NAO 式的大气环流异常, 因此大西洋前期大气环流对次年大西洋春季 NAO 位相也有重要影响。

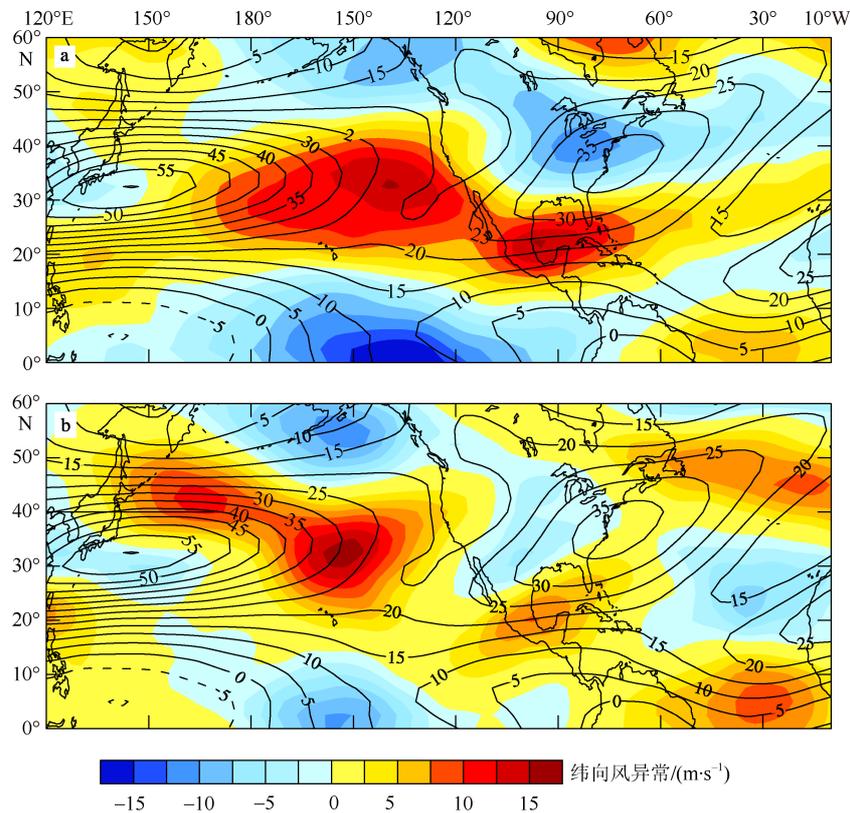


图 8 厄尔尼诺衰减年太平洋、大西洋区域 1—3 月 300hPa 纬向风异常的空间分布  
a. 1998 年; b. 2016 年; 等值线为气候态(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 8 Spatial distributions of Pacific and Atlantic anomalous zonal wind at 300 hPa (shading; units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and climatology (contour; units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in January-March in El Niño developing years. a) 1998; b) 2016

已有研究指出(Wang, 2004), 厄尔尼诺事件可以通过沃克环流和哈德莱环流影响北大西洋。1998 年的 1—3 月, 北大西洋  $20^{\circ}$ — $30^{\circ}\text{N}$  附近出现了明显强的异常上升支(图 9a), 与 NAO 负位相共同作用, 使亚速尔高压减弱, 东风信风明显减弱, 增强了热带北大西洋 SST 的增暖。沃克环流的影响体现在图 9c 中, 1998 年的沃克环流异常下沉支低层中心在大西洋地区的  $45^{\circ}\text{W}$  左右, 热带地区的下沉气流影响了哈德莱环流的异常, 形成在副热带地区的异常上升。2016 年并未出现明显的哈德莱环流异常(图 9b), 沃克环流的异常下沉支中心在  $60^{\circ}\text{W}$  左右, 对于北大西洋热带  $45^{\circ}\text{W}$  以东的地区影响较弱, 即通过沃克环流和哈德莱环流影响的机制较弱。

### 3 结论

本文研究了 1997—1998 与 2015—2016 年两次强厄尔尼诺事件衰减年春季北大西洋 SSTA 出现的不同特征, 使用海洋混合层诊断方程分析了 1998 年春季热带北大西洋暖 SSTA 的影响要素, 探讨了 2016 年与 1998 年春季 SSTA 差异的可能成因, 得到如下结果。

1998 年春季北大西洋 SSTA 呈现正负正的三极型分布, 从厄尔尼诺事件的峰值一月开始发展, 在三月达到第一次峰值后维持较高的指数, 并在夏季 7、8 月份达到最高; 2016 年春季 SSTA 表现为负三极型, 且异常值较小。

热力强迫对 1998 年春季热带北大西洋暖 SSTA 的影响最大, 包括海洋蒸发作用减弱和吸收的太阳短波辐射增强。蒸发作用减弱与东北信风减小、热带大西洋大气增暖有关。海洋内部的动力作用不可忽视, 主要贡献是纬向海流异常对平均暖海水的输送作用。

NAO 不同位相是引起 2016 年与 1998 年春季北大西洋不同 SSTA 形态的主要因素。1998 年 1—3 月北大西洋为 NAO 负位相, 其与北大西洋 SSTA 三极型正位相耦合。NAO 不同位相的形成则是 PNA 与北大西洋前期局地环流变化共同作用的结果。同时, 由厄尔尼诺引起的 Walker 环流强的异常下沉支, 位于热带北大西洋  $45^{\circ}\text{W}$  左右, 与 NAO 负位相的共同作用, 使亚速尔高压减弱, 东北信风减小, 海面蒸发减少, 增暖了热带北大西洋。2016 年为 NAO 正位相, Walker 环流异常下沉支中心在热带北大西

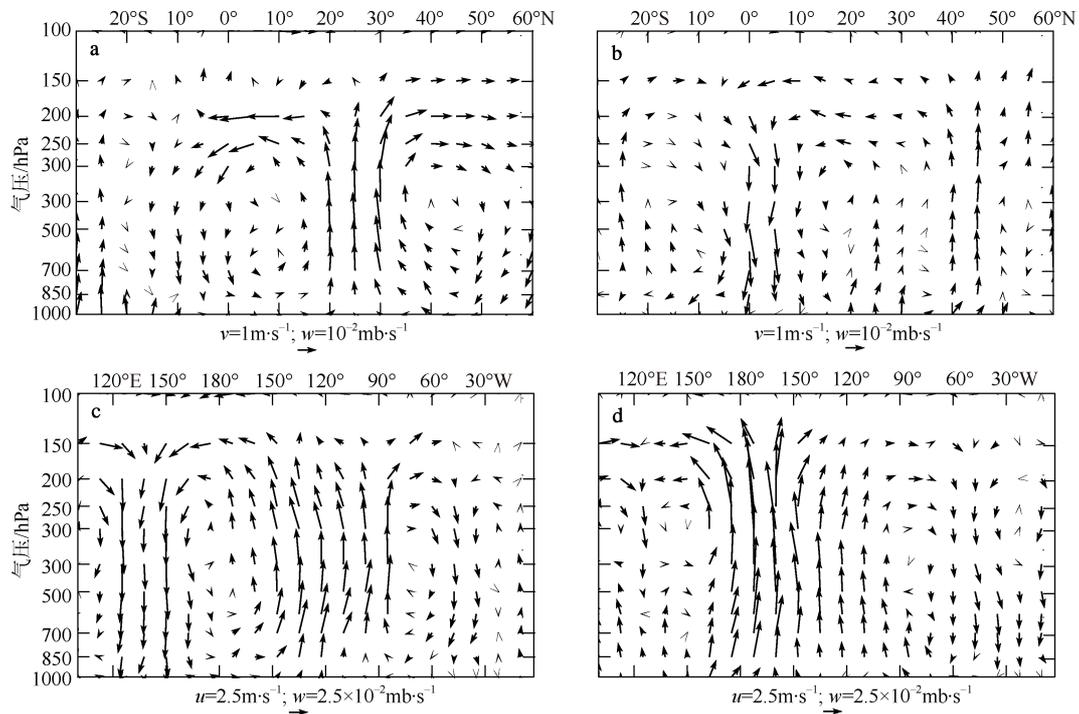


图9 厄尔尼诺衰减年1—3月大西洋区哈德莱环流异常区域(80°W—0°)内平均的经向辐散风(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )与垂直速度异常的经向垂直剖面结构(a, b, 单位:  $10^{-2}\text{mb}\cdot\text{s}^{-1}$ )及 Walker 环流异常区域(5°S—5°N)内平均的纬向辐散风(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )与垂直速度异常的纬向垂直剖面结构(c, d, 单位:  $10^{-2}\text{mb}\cdot\text{s}^{-1}$ )

a, c. 1998年; b, d. 2016年; 箭头表示两个矢量的合成

Fig. 9 Meridional vertical section structure of Hadley circulation anomalies in the Atlantic (between 80°W and 0°) by averaging anomalous longitudinal divergent wind (a, b; units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and anomalous vertical velocity, zonal vertical section structure of Walker circulation anomalies (between 5°S and 5°N) by averaging anomalous latitudinal divergent wind (units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and anomalous vertical velocity (c, d; units:  $10^{-2}\text{mb}\cdot\text{s}^{-1}$ ) during El Niño developing phase in January-March. (a, c) 1998; (b, d) 2016

洋 60°W 左右, 45°W 以东表现不明显。

1998年1—3月北大西洋NAO负位相可能与东亚副热带西风急流东侧和美国南部的强西风异常有关。强的副热带西风异常, 增强了副热带纬向Rossby波导作用, 有利于厄尔尼诺强迫的北太平洋东部的负位势高度异常向东传播, 引起副热带北大

西洋位势高度的副异常, 即NAO负位相。2016年的纬向西风异常幅度弱于1998年, 纬向波导作用也弱, 同时北大西洋前期为NAO正位相。对于1997—1998年厄尔尼诺峰值后副热带西风增强强于2015—2016年厄尔尼诺事件的原因, 未来将做进一步的研究。

## 参考文献 References

- 杜美芳, 徐海明, 周超, 2015. 基于CMIP5资料的热带大洋非均匀增暖及其成因的分析[J]. 热带海洋学报, 34(3): 1-12. DU MEIFANG, XU HAIMIN, ZHOU CHAO. 2015. Analysis of non-uniform sea surface temperature warming over the tropical oceans and its causes based on CMIP5 data[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2015, 34(3): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- 李刚, 李崇银, 江晓华, 等, 2015. 1900~2009年全球海表温度异常的时空变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 34(4): 12-22. LI GANG, LI CHONGYIN, JIANG XIAOHUA, et al. 2015. Analysis of spatiotemporal variability of global sea surface temperature anomalies during 1900~2009[J]. Journal of Tropical Oceanography, 34(4): 12-22 (in Chinese with English abstract).
- 李晓燕, 翟盘茂, 2000. ENSO事件指数与指标研究[J]. 气象学报, 58(1): 102-109. LI XIAOYAN, ZHAI PANMAO. 2000. On indices and indicators of ENSO episodes[J]. Acta Meteorologica Sinica, 58(1): 102-109 (in Chinese).
- 刘珊, 王辉, 姜华, 等, 2013. 北太平洋海表温度及各贡献因子的变化[J]. 海洋学报, 35(1): 63-75. LIU SHAN, WANG HUI, JIANG HUA, et al. 2013. Variation of sea surface temperature and its influence factors in the North Pacific[J]. Acta Oceanologica Sinica, 35(1): 63-75 (in Chinese with English abstract).
- 任宏昌, 左金清, 李维京, 2018. 1998年和2016年北大西洋海温异常对中国夏季降水影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, English abstract).

- 75(6): 877–893. REN HONGCHANG, ZUO JINQING, LI WEIJING. 2017. Role of the North Atlantic SST anomalies in the 1998 and 2016 summer floods in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(6): 877–893 (in Chinese with English abstract).
- 薛峰, 段欣妤, 苏同华, 2018. 强 El Niño 衰减年东亚夏季风季节内变化: 1998 年和 2016 年的对比分析[J]. *大气科学*, 42(6): 1407–1420. XU FENG, DUAN XINYU, SU TONGHUA, 2018. Intraseasonal variation of East Asian summer monsoon during strong El Niño decaying summer: comparison between 1998 and 2016[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(6): 1407–1420 (in Chinese with English abstract).
- 郑依玲, 陈泽生, 王海, 等, 2019. 2015/2016 年超强厄尔尼诺事件基本特征及生成和消亡机制[J]. *热带海洋学报*, 38(4): 10–19. ZHENG YILING, CHEN ZESHENG, WANG HAI, et al. 2019. Features of 2015/2016 extreme El Niño event and its evolution mechanisms[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 38(4): 10–19 (in Chinese with English abstract).
- AMAYA D J, FOLTZ G R, 2014. Impacts of canonical and modoki El Niño on tropical Atlantic SST[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(2): 777–789.
- BJERKNES J, 1964. Atlantic air-sea interaction[J]. *Advances in Geophysics*, 10: 1–22.
- BJERKNES J, 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 97(3): 163–172.
- BRÖNNIMANN S, 2007. Impact of El Niño–southern Oscillation on European climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 45(3): RG3003.
- CARTON J A, CAO XIANHE, 1996. Decadal and interannual SST variability in the tropical Atlantic Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 26(7): 1165–1175.
- CAYAN D R, 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: driving the sea surface temperature[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 22(8): 859–881.
- CHIANG J C H, SOBEL A H, 2002. Tropical tropospheric temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate[J]. *Journal of Climate*, 15(18): 2616–2631.
- CURTIS S, HASTENRATH S, 1995. Forcing of anomalous sea surface temperature evolution in the tropical Atlantic during Pacific warm events[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C8): 15835–15847.
- CZAJA A, MARSHALL J, 2001. Observations of atmosphere-ocean coupling in the North Atlantic[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(576): 1893–1916.
- DELWORTH T L, 1996. North Atlantic interannual variability in a coupled ocean-atmosphere model[J]. *Journal of Climate*, 9(10): 2356–2375.
- DELWORTH T L, GREATBATCH R J, 2000. Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing[J]. *Journal of Climate*, 13(9): 1481–1495.
- ENFIELD D B, MAYER D A, 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño–southern Oscillation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C1): 929–945.
- GARCÍA-SERRANO J, CASSOU C, DOUVILLE H, et al, 2017. Revisiting the ENSO teleconnection to the tropical North Atlantic[J]. *Journal of Climate*, 30(17): 6945–6957.
- GILL A E, 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(449): 447–462.
- GOUIRAND I, MORON V, 2003. Variability of the impact of El Niño–southern Oscillation on sea-level pressure anomalies over the North Atlantic in January to March (1874–1996)[J]. *International Journal of Climatology*, 23(13): 1549–1566.
- GRAF H F, ZANCHETTIN D, 2012. Central Pacific El Niño, the “subtropical bridge,” and Eurasian climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D1): D01102.
- HALLIWELL G R JR, 1998. Simulation of North Atlantic decadal/multidecadal winter SST anomalies driven by basin-scale atmospheric circulation anomalies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 28(1): 5–21.
- HOREL J D, WALLACE J M, 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 109(4): 813–829.
- KLEIN S A, SODEN B J, LAU N C, 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge[J]. *Journal of Climate*, 12(4): 917–932.
- KUSHNIR Y, 1994. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions[J]. *Journal of Climate*, 7(1): 141–157.
- LEE S K, WANG CHUNZAI, MAPES B E, 2009. A simple atmospheric model of the local and teleconnection responses to tropical heating anomalies[J]. *Journal of Climate*, 22(2): 272–284.
- LI T, ZHANG YONGSHENG, LU ER, et al, 2002. Relative role of dynamic and thermodynamic processes in the development of the Indian Ocean dipole: an OGCM diagnosis[J]. *Geophysical Research Letters*, 29(23): 2110.
- ROPELEWSKI C F, HALPERT M S, 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/southern Oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 115(8): 1606–1626.
- SARAVANAN R, CHANG PING, 2000. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño–southern Oscillation[J]. *Journal of Climate*, 13(13): 2177–2194.
- SU JINGZHI, ZHANG RENHE, LI T, et al, 2010. Causes of the El Niño and La Niña amplitude asymmetry in the equatorial eastern Pacific[J]. *Journal of Climate*, 23(3): 605–617.
- SUTTON R T, ALLEN M R, 1997. Decadal predictability of North Atlantic sea surface temperature and climate[J]. *Nature*, 388(6642): 563–567.
- TALLEY L D, 1984. Meridional heat transport in the Pacific Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 14(2): 231–241.
- TRENBERTH K E, CARON J M, 2000. The southern Oscillation

- revisited: sea level pressures, surface temperatures, and precipitation[J]. *Journal of Climate*, 13(24): 4358–4365.
- WANG CHUNZAI, 2004. ENSO, Atlantic climate variability, and the Walker and Hadley circulations[M]//DIAZ H F, BRADLEY R S. *The Hadley circulation: Present, past and future*. Dordrecht: Springer: 173–202.
- WU RENGUANG, YANG SONG, LIU SHI, et al, 2010. Changes in the relationship between northeast China summer temperature and ENSO[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D21): D21107.
- YU JINHUA, CHEN CHENG, LI T, et al, 2016. Contribution of major SSTA modes to the climate variability of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(695): 1171–1181.
- ZHANG WENJUN, WANG ZIQI, STUECKER M F, et al, 2019. Impact of ENSO longitudinal position on teleconnections to the NAO[J]. *Climate Dynamics*, 52(1–2): 257–274.