

北大西洋年际变率的海气耦合模式模拟 II： 热带太平洋强迫^{* 1}

周天军¹ 宇如聪¹ 郜永祺^{2,3} Helge Drange³

1 中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京, 100029

2 中国科学院大气物理研究所 NZC, 北京, 100029

3 Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway

摘 要

利用一个全球海气耦合模式(BCM),结合观测资料,讨论了热带太平洋强迫对北大西洋年际气候变率的影响。研究表明,BCM 能够相对合理地模拟赤道太平洋的年际变率模态及相应的海温距平型和大气遥相关型,尽管其准 3 年的振荡周期过于规则。来自数值模式和观测上的证据都表明,北大西洋冬季海温的主导性变率模态,即自北而南出现的“一十一”的海温距平型,受到来自热带太平洋强迫的显著影响,其正位相与赤道中东太平洋冷事件相对应。换言之,赤道太平洋暖事件的发生,在太平洋—北美沿岸激发出 PNA 遥相关型,进而通过在北大西洋产生类似 NAO 负位相的气压距平型,削弱本来与 NAO 正位相直接联系的三核型海温距平。北大西洋三核型海温距平对热带太平洋强迫的响应,要滞后 2—3 个月的时间。

关键词: 北大西洋, 年际变率, 热带太平洋, 遥相关, 海气耦合模式。

1 引 言

作为导致全球气候异常的一个重要源头,厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)现象已经得到了人们广泛的研究^[1-3]。关于 ENSO 与热带太平洋地区气候异常的关系,目前人们已经有比较清楚的了解^[4]。然而,关于 ENSO 对北大西洋中高纬度地区气候的影响,目前我们尚知之不多,结论也不够统一^[5]。初步分析表明,受观测记录时间序列比较短的限制,ENSO 和基于海平面气压(SLP)的北大西洋涛动(NAO)指数之间的相关性很弱^[6-7]。利用 1951—1996 年的资料研究发现,基于 SLP 的 NAO 指数几乎和赤道太平洋表层海温(SST)的 Nino 3 指数没有显著相关^[8];但是,基于温度资料的 NAO 指数和 Nino 3 指数在 1900—1991 年存在较弱的负相关(−0.24)^[9]。

在许多海气耦合模式中,Nino 指数和 NAO 指

数之间存在显著的负相关^[8-9]。近年来有研究表明,伴随着 ENSO 事件的发生,北大西洋地区的大气环流的确有变化^[10-12],并且已经发现 ENSO 影响欧洲温度和降水的确凿证据^[13-17]。Grotzner 等^[18]利用观测资料和模式结果,指出 1997/1998 年 El Niño 事件和 1998 年 La Nina 事件对北大西洋地区气候的不同影响。Dong 等^[19]利用观测 SST 强迫一个大气环流模式,证明 1997/1998 和 1998/1999 年冬季北大西洋地区的气候异常与 ENSO 循环有关。特别是他们发现了 El Niño 和 La Nina 对北大西洋气候的相反的影响。Pozo-Vazquez 等^[20]的观测分析发现,在北大西洋地区,伴随着 ENSO 暖事件的发生,SLP 距平在统计上的确不显著,但是伴随着 ENSO 冷事件的发生,SLP 的变化是显著的,并且在形态上非常像 NAO 的正位相。这一结果证实了 Dong 等^[19]关于 1998/1999 年 La Nina 事件对北大西洋地区大气环流

* 初稿时间:2005 年 7 月 18 日;修改稿时间:2005 年 10 月 8 日。

资助课题:国家重点基础研究专项经费资助的项目(2005CB321703)、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”和国家自然科学基金项目(40375029,40233031)。

作者简介:周天军,男,1969 年生,博士,研究员。主要从事海气耦合模式的研制与应用、海气相互作用和气候变率研究。

影响的分析,并且和 Fraedrich 的结果^[11]相一致,后者指出 ENSO 冷事件对欧洲气候的影响要大于暖事件。Lau 和 Nath^[21]的观测和模拟研究表明,ENSO 强迫能够引起欧洲地区冬季大气环流的变化,大气遥相关型随后改变了局地海气界面上的热交换;这一通过“大气桥”机制产生的热带外 SST 异常通常在晚冬或早春达到最强。Pohlman^①将一个大气环流模式与一个平板海洋模式耦合,但把热带太平洋的 SST 设定为 1997/1998 年 El Niño 事件的情况,结果发现热带太平洋 SST 异常能够影响到 NAO,具体表现为冰岛/北极地区 SLP 升高、副热带北大西洋地区的 SLP 降低。

关于联系热带强迫和北大西洋地区热带外环流变化的机制,Pozo-Vazquez 等^[20]认为太平洋—北美遥相关型(PNA)在其中可能起作用。Giannini 等^[22-23]认为 ENSO 与大西洋地区的遥相关是 Lau 等^[24-26]提出的“大气桥”的一个组成部分,并且它可以分成热带分量和热带外分量两部分;热带响应纯粹依赖于赤道中东太平洋海温异常的加热、并且在 SLP 距平上表现为纬向的跷跷板型变化;热带外大气对 ENSO 的响应主要集中在冬季,具体表现为 PNA 型。因为 PNA 和 NAO 的大气活动中心在具体位置上并不严格一致,所以如果直接求 ENSO 指数和 NAO 指数之间的相关系数,结果肯定是不显著的。另外,Pozo-Vazquez 等^[20]还指出,热带大西洋 SST 也可能是连接热带太平洋 SST 异常和北大西洋地区大气环流异常的一个有效纽带。Latif 和 Grotzner^[27]发现 ENSO 事件能够对赤道大西洋 SST 变率产生影响。Saravan 和 Chang、Li^[28-29]也都报道了 ENSO 对热带大西洋的影响。研究表明,热带大西洋的加热作用,能够影响到北大西洋地区的大气环流。例如,Rajagopalan 等^[30]发现了热带大西洋 SST 影响 NAO 状态的证据。Watanabe 和 Kimoto^[31]发现热带大西洋 SST 异常能够增强 NAO 和北大西洋地区的其他环流。Robertson 等^[32]也报道热带大西洋 SST 距平能够对 NAO 产生重要影响。

本文利用一个全球海气耦合模式——卑尔根气候模式(BCM)的长期积分结果,结合有限的观测资料,讨论热带太平洋强迫对北大西洋年际气候变率

的影响。BCM 对北大西洋、北海(Nordic Seas)和北冰洋相对细致的处理^[33-34]、及其对北大西洋 SST 年际变率主导模态、局地海气相互作用的相对理想的模拟^[35],是促使作者利用该模式来进一步讨论热带强迫与北大西洋中高纬度年际变率关系的重要原因。

BCM 总计完成了 328 年的完全耦合积分,本文舍弃掉最初 28 年的结果,以扣除海洋与大气模式耦合之初的调整过程影响。注意尽管 BCM 从全球平均 SST 时间序列来看,其气候漂移很弱^[33],但对于单个格点上的数据来说,其线性漂移趋势可能很强。因此,本文对模式结果进行的所有分析,事先都进行去倾处理。这是利用耦合气候模式开展气候变率问题研究时所必须注意的问题,否则,气候漂移趋势会导致许多虚假的气候要素间的联系。

2 热带太平洋年际变率的模拟

揭示年际变率主导模态的基本途径,或是看方差分布,或是借助经验正交函数展开(EOF)等分析手段。利用 BCM 的 300 年耦合积分结果,对冬季平均 SST 距平(定义为 11 月到次年 3 月总计 5 个月的平均值)做 EOF 展开,得到的第一个主导模态(图 1a),赤道中东太平洋 SST 为正距平,是典型的 El Niño 型海温异常。与该模态对应的主分量(时间系数)(图 1b)和模式 Nino 3 区(5°N—5°S,150°—90°W)SST 距平(图 1c)的相关系数为 0.98,BCM 较为合理地模拟出了赤道太平洋的年际变率模态。当然,这种模式 El Niño 模态的正距平过于集中在赤道区域、其经向范围不够宽,实际观测中沿着太平洋北美沿岸向北传播的正距平,在模式中也偏弱,这是目前许多海气耦合模式的常见问题^[36]。

对模式 Nino 指数(定义为 PC1)做功率谱分析和 Morlet 子波变换^[37](图 2),主要表现出年际尺度的变率特征,达到 95%信度水平的谱峰主要集中在 3 年左右,年代际尺度上的振荡不明显。该特征在子波变换的结果上亦有反映,并且在 300 年的耦合积分过程中,这种准 3 年尺度的振荡近乎是规则分布的。模拟的 ENSO 周期间隔过于规则,这也是当前海气耦合模式的共有现象^[36]。

Nino 指数与同期(北半球冬季)SLP 和 SST 距

① Pohlmann H. (2003), Influence of SST on the NAO variability (私人通信 holger. pohlmann@dkrz.de)

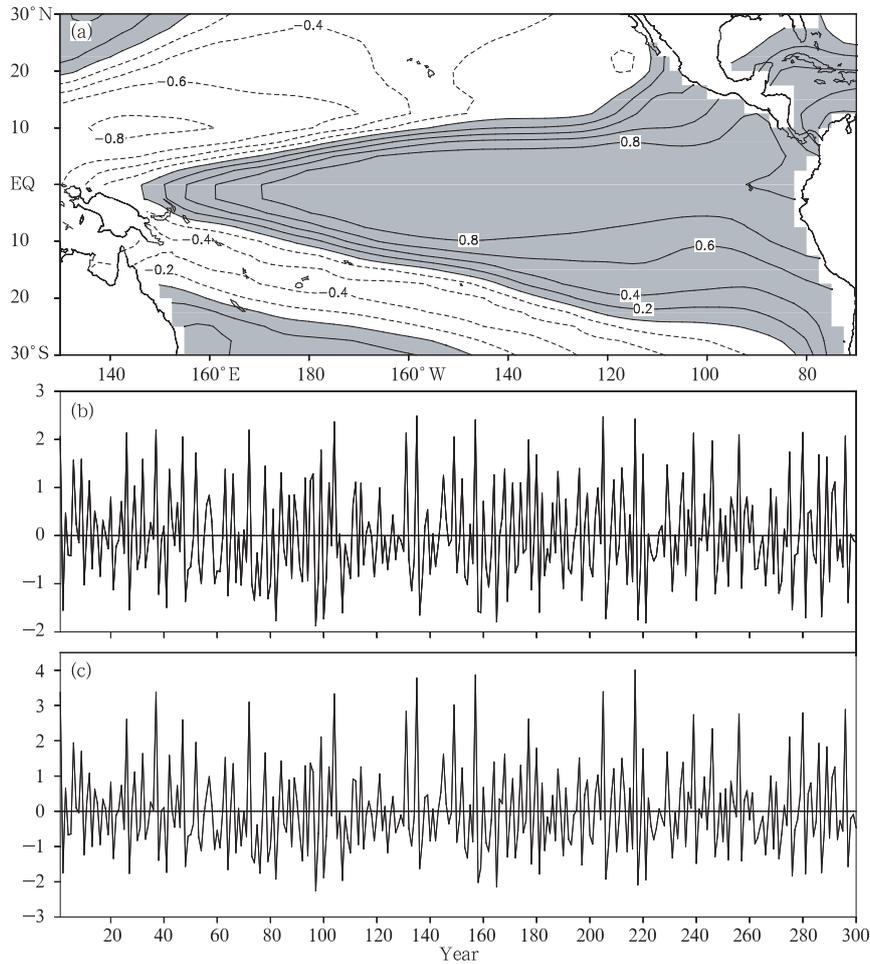


图 1 耦合模式中热带太平洋冬季平均 SST 距平第一个 EOF 模态的空间型(a)及其主分量(b)、冬季 Nino 3 指数(c)(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(图 a 中的 EOF 模态被表示为 SST 距平与主分量的相关系数,图 b 中的主分量是标准化后的结果)

Fig. 1 Spatial pattern of the first EOF mode of wintertime mean (Nov-Mar) model SST anomalies (a), the associated normalized principal component (b), and the Nino 3 index (c) time series

(units are $^{\circ}\text{C}$; The EOF pattern is shown as the correlation coefficient between the SST anomalies and the principal component)

平的相关系数分布见图 3。SLP 的变化在热带表现为南方涛动(SO)的负位相,SLP 在赤道西太平洋地区为正距平,在赤道东太平洋为负距平。在北半球中高纬度,从太平洋北美沿岸、北美大陆到北大西洋的北美沿岸,SLP 呈现出“一十”的距平分布,表现为 PNA 型的波列特征。热带及北半球 SLP 距平场的这种响应及遥相关型,与实际观测是吻合的^[5]。南半球极地区域的 SLP 出现正距平,澳洲大陆东南及南印度洋 SLP 呈负距平型,这对应的是南极涛动(AAO)^[38]的负位相。关于 ENSO 对南半球中高纬度大气环流的影响,有证据表明,赤道中东太平洋的

暖事件,与 AAO 的负位相基本是对应的^[39-40]。

与 Nino 指数相联系的全球 SST 距平分布型(图 3b)亦较为接近实际(参见文献[41]的图 11 或文献[42]),这主要体现在伴随赤道中东太平洋变暖所出现的以赤道西太平洋为端点、向两半球副热带太平洋伸展的“楔型”负海温距平区、赤道印度洋和赤道大西洋的变暖等。海气耦合模式在模拟与 ENSO 事件相关联的热带大洋海温距平型方面经常出现的一个问题,是模拟的西太平洋暖池区的负海温距平向西伸展过强、以至在赤道东印度洋出现大范围的虚假负距平,呈现出一种“印度洋偶极子”型,这

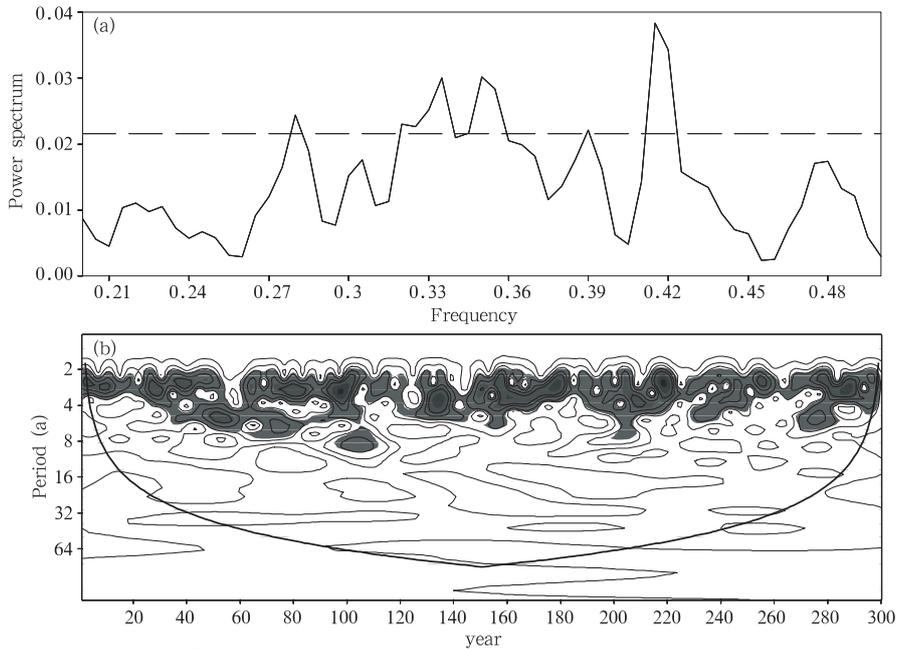


图 2 耦合模式 Nino 指数时间序列(PC1)的功率谱分布(a)、Nino 指数时间序列的 Morlet 子波变换(b)

(图 a 虚线表示 95% 信度检验;图 b 中阴影区具有 95% 的信度)

Fig. 2 Power spectrum (a), and the local Morlet wavelet spectrum of the simulated Nino index time series (b)

(The dashed line of (a) represent the 95% confidence limits. Shaded regions of (b) are above the 95% confidence limits. The unit of x-axis is 1/a in (a), and the unit of y-axis is a in (b))

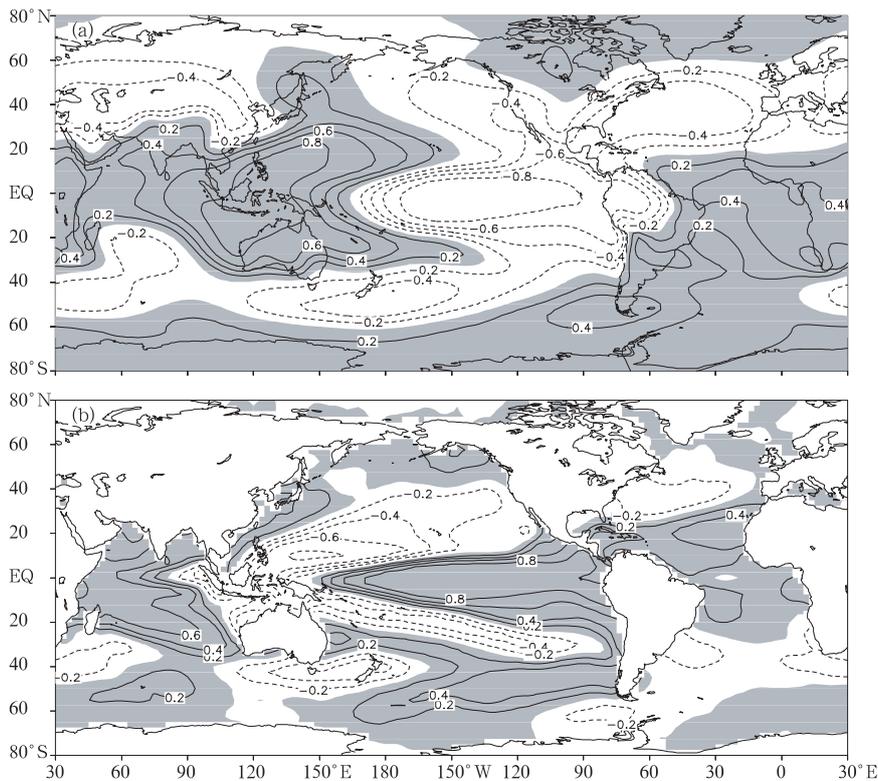


图 3 耦合模式中冬季 Nino 指数(PC1)与同期海平面气压(a)和表层海温(b)的相关系数分布

(只绘出达到 95% 信度水平的等值线;阴影区表示正相关)

Fig. 3 Spatial pattern of the correlation coefficient between the anomalous SLP (a), SST (b) and the wintertime mean (Nov-Mar) Nino index time series (Only contours above the 95% confidence limits are shown. Shaded regions represent positive correlations)

种“偶极子”型实际上是因模式性能欠缺而错误地导致的 ENSO 响应^[43],它不应和备受争议的所谓“印度洋偶极子”混为一谈,现在多认为印度洋偶极子指数(DMI)实质上反映的是赤道印度洋 SST 的纬向梯度,并非有严格物理意义的、类似 SO 或 NAO 那样的跷跷板型正、负距平的反位相变化^[44]。关于印度洋对 ENSO 的响应及其固有的年际变率模态,这不是本文的重点,亦不拟在此做过多讨论,这里只着重指出,BCM 中热带印度洋对 ENSO 事件的响应,主要表现为均匀一致的增暖,这和观测接近,也较之一些耦合模式的虚假“偶极子型”有明显改进^[43]。BCM 模拟的与 ENSO 相关联的 SST 距平型,亦有其不尽合理之处,例如,实际观测中伴随着赤道东太平洋变暖而出现的北太平洋(30°—40°N) SST 冷距平^[36],在模式中没有得到合理反映。不过总体而言,BCM 在模拟 ENSO 事件上的能力是可以接受的,尽管这种“模式 ENSO”型的振荡周期过于规则。

3 热带强迫与北大西洋年际变率

3.1 耦合模式的结果

与观测相比,BCM 所模拟的 NAO 模态特点^[34]、时间演变的谱分布特征^[35],都较为接近实际。不足之处是北太平洋 SLP 的信号过强,同样的现象,在其他模拟研究中也有报道^[8,45-46]。关于 NAO 与 ENSO 的关系,图 1c 中的 Nino 3 指数与 NAO 指数序列(见文献^[34]的图 4b)的同期相关系数是 -0.23,在统计上具有 95% 的信度。这一结果和 HadCM2 极为相似^[8]。类似的显著负相关,同样存在于 NCAR CSM, ECHAM4 和 CCSR 模式^[9]。但是,在实际气候系统中,现有的观测资料表明 Nino 指数与 NAO 指数之间的相关性很弱,尽管在 1900—1949 年二者的相关性要强一些,但是在 1951—1996 年,无论是直接比较两个指数序列、还是先进行高频、低频、抑或带通滤波处理, Nino 指数和 NAO 指数的相关都不显著^[8]。资料序列的时间长度太短、用 NAO 指数基于海平面气压可能是一原因^[6,47]。的确,如果利用气温而不是 SLP 来定义 NAO 指数,观测中的确发现 NAO 与 Nino3 指数存在较弱的、然而统计上显著的负相关(-0.24)^[9]。究竟是数值模式中的热带—热带外遥相关过强、还是基于 SLP 的 NAO 指数难以合理反映温度遥相关现象,这

尚待研究。本文关心的是,BCM 中的热带太平洋强迫,是否会影响到北大西洋的年际变率。这种可能存在的遥相关,最早由 Hoerling 等^[48]提出,不过他们强调的是热带印度洋对 NAO 长期趋势的影响。

将表征三核型 SST 异常强度变化的时间序列(简称“三核型 SST 距平指数”,见文献^[35]中的图 3b),与太平洋区域的逐月 SLP 距平求超前/落后相关(图 4)。从滞后 -3 个月到 +1 个月,热带太平洋 SLP 距平型呈现出显著的南方涛动 SO 正位相,这意味着热带太平洋对北大西洋年际变化的强迫作用。最强的南方涛动正位相出现在滞后 -1 个月,即北大西洋三核型 SST 异常达到最强状态之前 1 个月。对应南方涛动正位相的 SLP 距平型,可以解释为三核型 SST 距平指数与 Nino 指数的负相关,因为 El Niño 事件对应南方涛动的负位相;三核型 SST 距平指数的正位相(自北而南呈“—+—”结构)对应的是 NAO 的正位相^[35]。

为直观反映与北大西洋三核型 SST 异常相对应的热带太平洋海温异常,类似图 4 的作法,将三核型 SST 距平指数与热带太平洋 SST 距平求超前/落后相关(图 5)。从滞后 -3, -2, -1 个月到同步,赤道中东太平洋出现显著的负相关。将相关系数的空间型与图 1a 所示的模式 El Niño 型做比较,可见图 5 实际反映的是模式中 ENSO 的冷位相即 La Nina 事件。如果将热带太平洋净海表热通量距平与三核型 SST 距平指数同样求超前/落后相关,所得结果同样支持“热带太平洋强迫北大西洋”这一情景(图略)。

为揭示北大西洋三核型 SST 异常与赤道中东太平洋海温异常的演变关系,图 6 给出逐月的 Nino 3 指数和三核型 SST 距平指数的超前/落后相关,显著的负相关发生在 Nino 3 指数超前三核型 SST 距平指数 3 个月,随后相关性逐渐增强,到同步时达到最大,持续一个月后,快速减弱并逐渐变得不显著。两个时间序列的上述演变趋势,亦表明是“赤道太平洋强迫北大西洋”而不是相反。

那么,联系赤道太平洋和北大西洋 SST 年际变化的大气环流型如何?图 7 给出模式中 Nino3 指数与 SLP 在不同超前时间上的回归系数分布。伴随着赤道中东太平洋暖事件的发生,北太平洋—北美—大西洋区域 SLP 出现 PNA 型的异常分布,这种 SLP 异常型在零滞后最强,随后尽管强度减弱,

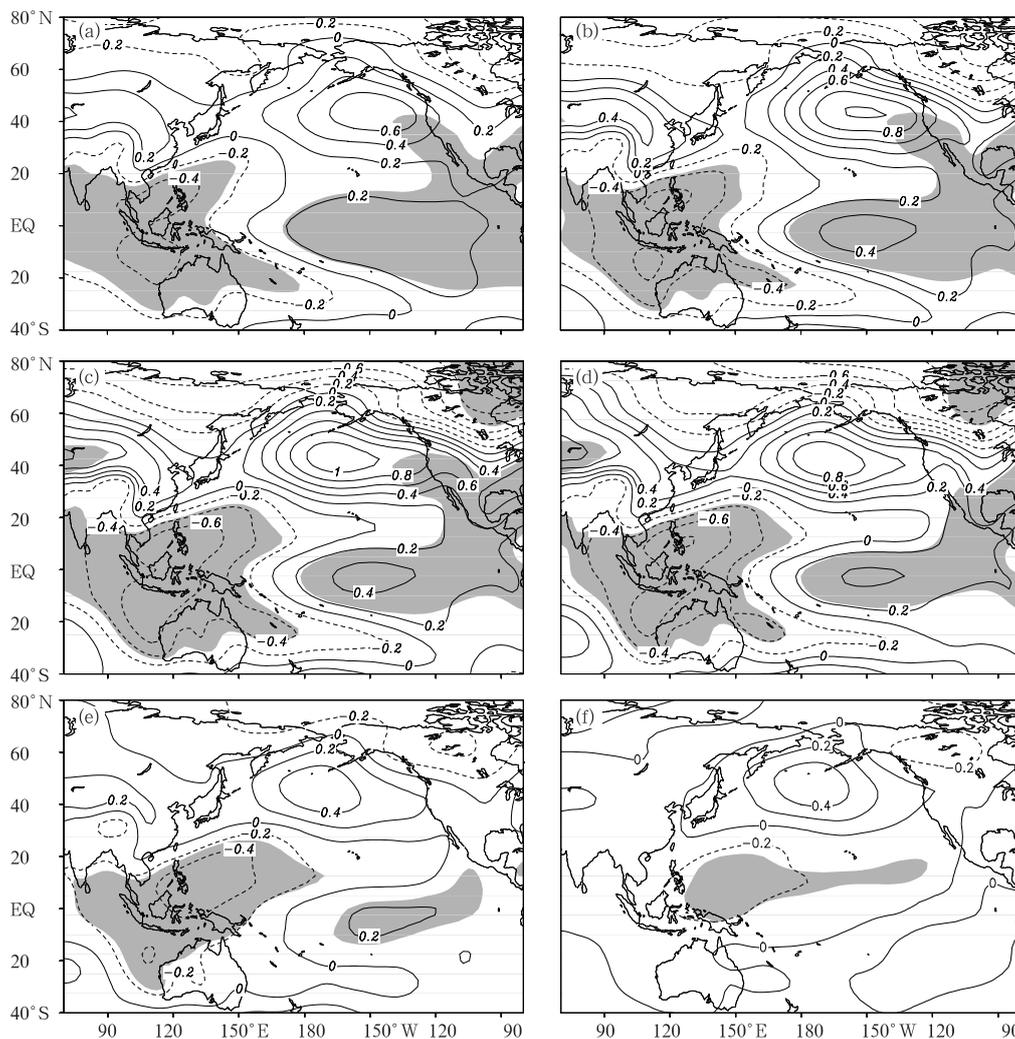


图4 逐月北大西洋三核型 SST 距平指数与太平洋 SLP 距平的超前/滞后相关系数分布(滞后-1(+1)表示三核型 SST 异常达到最强之前(之后)1个月的情况;等值线间隔为 0.2;阴影区具有 95% 的信度。a. -3 个月, b. -2 个月, c. -1 个月, d. 0 个月, e. +1 个月, f. +2 个月)

Fig. 4 Lagged correlations between the Pacific SLP anomalies and the North Atlantic tri-polar SST index time series in the model

(A lag of -1(+1) indicates conditions 1 month prior (subsequent) to a maximum in the tri-polar North Atlantic SST pattern. Contour interval is 0.2. Shaded regions are above the 95% confidence limits; a. Lag -3 months, b. lag -2 months, c. lag -1 months, d. lag 0 months, e. lag +1 months and f. lag +2 months)

但依然能够持续 3 个月左右,北大西洋中高纬度 SLP 最终呈现出类似 NAO 负位相的特征。BCM 中 El Niño 事件与北大西洋三核型 SST 异常的联系,是通过 PNA 遥相关型最终影响 NAO 模态而实现的。图 7 所反映的物理本质,实质与图 6 相一致。

3.2 观测证据

对应图 4 的模式结果,图 8 给出来自观测上的

证据,这里所用的 SLP 资料来自 NCEP/NCAR 再分析^[49]。观测的三核型 SST 距平指数见文献^[35]中的图 1a,但这里采用的是冬季逐月的 SST 指数序列,其中 SST 资料来自 Hadley 气候中心。在北大西洋三核型 SST 异常达到最强状态之前 4—2 个月,热带太平洋 SLP 距平型呈南方涛动正位相特征,但是这种距平型较之模式结果要弱,并且主要集中在

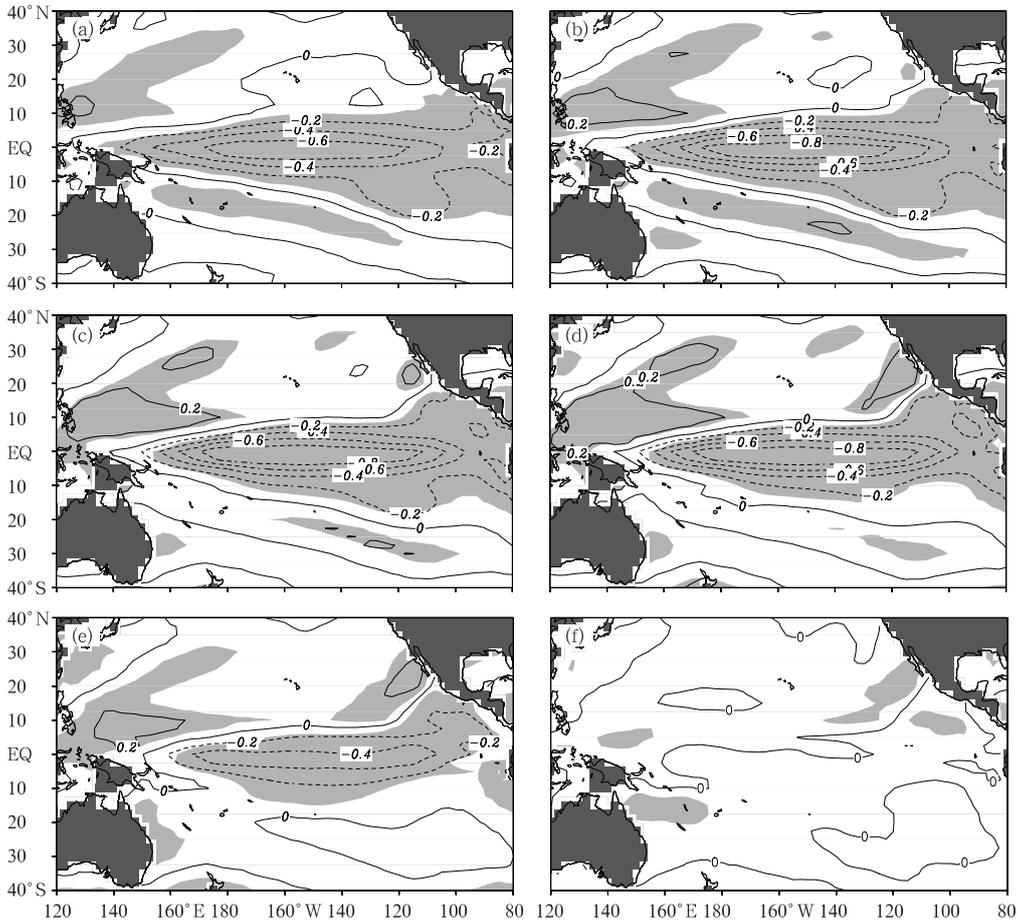


图 5 模式中逐月的北大西洋三核型 SST 距平指数与太平洋 SST 距平的超前/滞后相关 (滞后 -1(+1) 表示三核型 SST 异常达到最强之前(之后)1 个月的情况;等值线间隔为 0.2, 阴影区表示 95% 的信度; a. -3 个月, b. -2 个月, c. -1 个月, d. 0 个月, e. +1 个月, f. +2 个月)

Fig. 5 Lagged correlations between the Pacific SST anomalies and the North Atlantic tri-polar SST index time series in the model

(A lag of -1(+1) indicates conditions 1 month prior (subsequent) to a maximum in the tri-polar North Atlantic SST pattern Contour interval is 0.2. Shaded regions are above the 95% confidence limits; a. Lag -3 months, b. lag -2 months, c. lag -1 months, d. lag 0 months, e. lag +1 months, and f. lag +2 months)

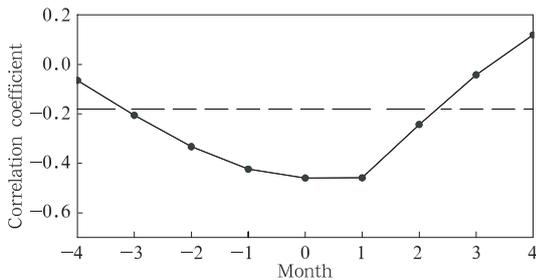


图 6 BCM 中逐月的 Nino3 指数和三核型 SST 距平指数的超前/落后相关 (横坐标负值对应 Nino 指数超前三核型 SST 距平指数的月数, 正值对应滞后的月数)

Fig. 6 The leading-lag correlation coefficients between the monthly Nino 3 index and the North Atlantic tri-polar SST index in BCM (Negative values of the x-axis indicates the months of the Nino index leading the tri-polar SST index, while positive values of the x-axis indicates the months of the tri-polar SST index leading the Nino index. The y-axis indicates the correlation coefficient.

赤道中东太平洋(150°—90°W), 其在西太平洋区域的信号, 要明显弱于赤道中东太平洋。此外, 与北大西洋三核型 SST 异常同步乃至落后的 SLP 距平型, 在赤道太平洋不显著。因此, 在观测中, 亦是赤道太平洋的年际变化, 影响到随后北大西洋海温的年际变化。前文模式结果所揭示的联系特征是可信的。

与图 5 相对应的观测中的赤道太平洋 SST 的变化见图 9。在北大西洋三核型 SST 异常达到最强状态之前 3—2 个月, 赤道中东太平洋 SST 出现显著的负距平。从超前 1 个月到同步, 赤道中东太平洋的 SST 信号逐渐减弱。SST 负距平主要集中在 160°E 以东的赤道太平洋。

比较观测和模拟结果, 耦合模式中的热带太平洋与北大西洋的联系, 较之观测偏强; 尽管如此, 这

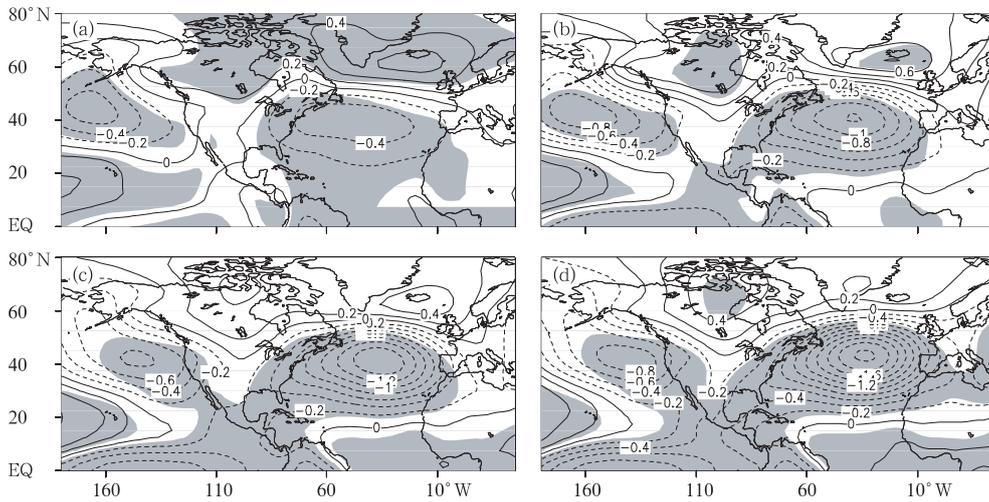


图 7 BCM 中 Nino3 指数与 SLP 距平的超前回归系数分布

(+1 表示赤道东太平洋暖事件超前 SLP 1 个月的情况(单位是 hPa/标准差);

a. 3 个月, b. 2 个月, c. 1 个月 d. 0 个月。阴影区达到 95% 的信度水平)

Fig. 7 Lagged correlations between the SLP anomalies and the Nino 3 index in the model (A lag of -1(+1) indicates conditions 1 month prior (subsequent) to a maximum in the eastern Pacific warm event Units are hPa per standard deviation. Shaded regions are above the 95% confidence limits;

a. Lag -3 months, b. lag -2 months, c. lag -1 months, and d. lag 0 months)

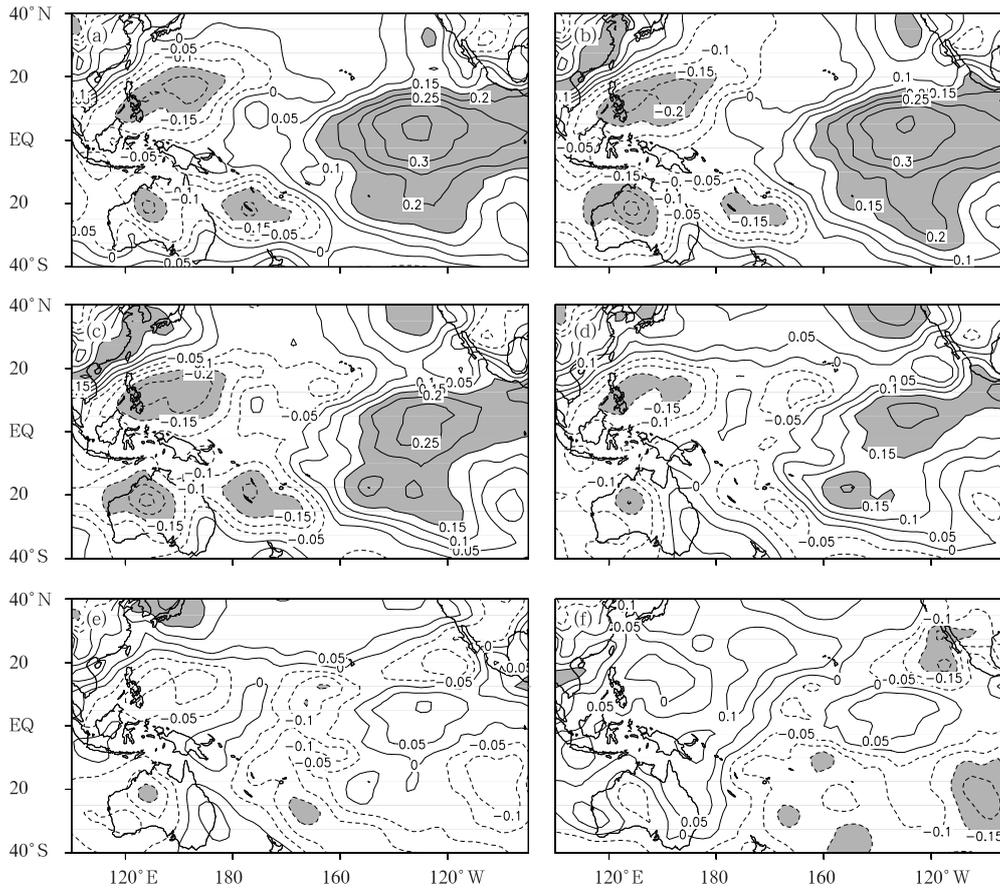


图 8 同图 4, 但为观测资料的结果, 并且给出的是 -4 到 +1 个月的情况

Fig. 8 Same as Fig. 4 but for the observation and the lag time ranges from -4 to 1 months

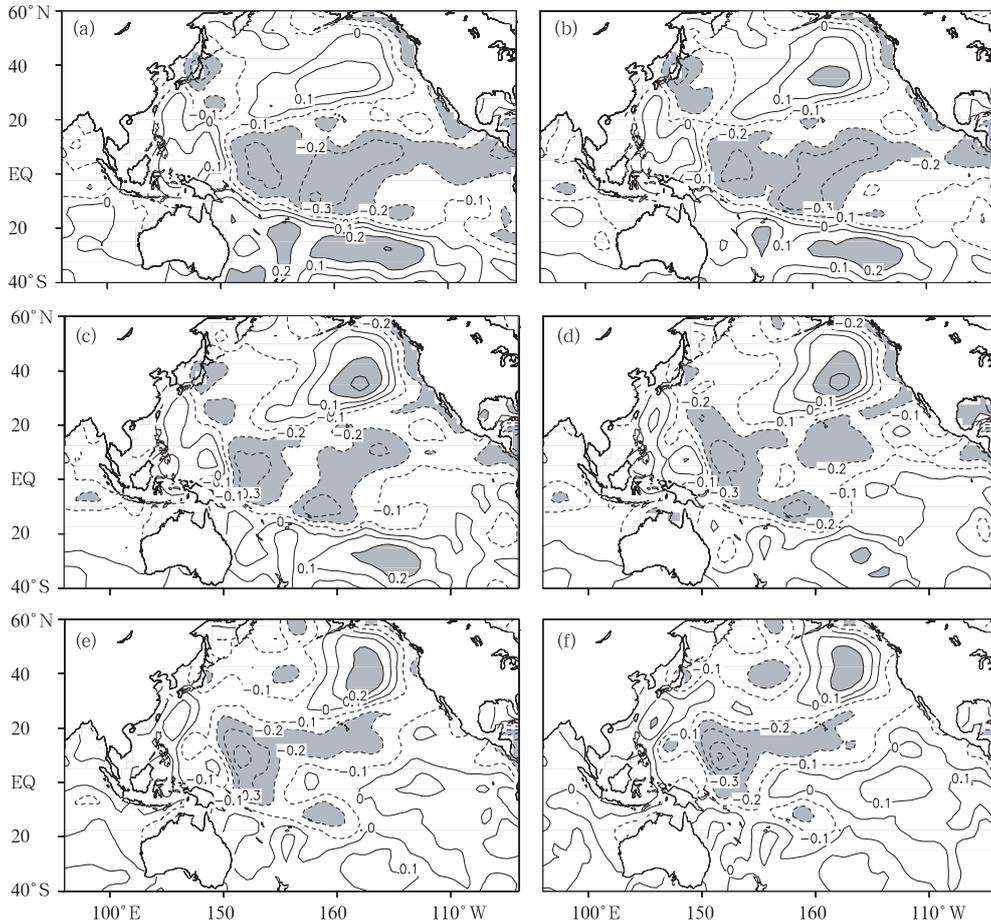


图9 同图5,但为观测资料的结果

Fig. 9 Same as Fig. 5 but for the observation

种联系在实际气候系统中的确存在,北大西洋海温的年际变率,的确受到来自热带太平洋强迫的影响。图10进一步给出观测中 Nino 指数与三核型 SST 异常指数的超前/落后相关,显著负相关发生在 Nino 指数超前 4—1 个月,即在赤道中东太平洋暖事件达到最强之后 1—4 个月,北大西洋三核型 SST 异常与 Nino 指数依然存在着统计上显著的负相关关系。

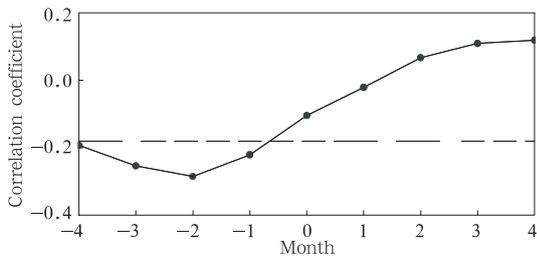


图10 同图6,但为观测资料的结果

Fig. 10 Same as Fig. 6 but for the observation

比较观测和模式结果,北大西洋海温对来自赤道中东太平洋强迫的滞后响应,在模式中的持续时间较之实际要短 1 个月左右。

观测中 Nino 指数超前 SLP 0—3 个月时的回归系数分布见图 11。与赤道中东太平洋暖事件相联系的 SLP 型,在太平洋—北美—大西洋地区同样表现为 PNA 型,这种异常型可以持续 3 个月。该特征和图 10 是一致的。在赤道中东太平洋暖事件发生后 2—3 个月,北大西洋 SLP 距平型亦逐渐表现出类似 NAO 负位相的特征,但是这种空间型不像模式结果那样显著,也并非和正常状态下 NAO 的活动中心严格对应,如前文所言,这是导致实际观测中 ENSO 指数与 NAO 指数相关不够显著的重要原因。因此,北大西洋中高纬度大气环流对 ENSO 事件的响应特征,与该地区大气环流固有的内部变率模态,不是严格对应的。

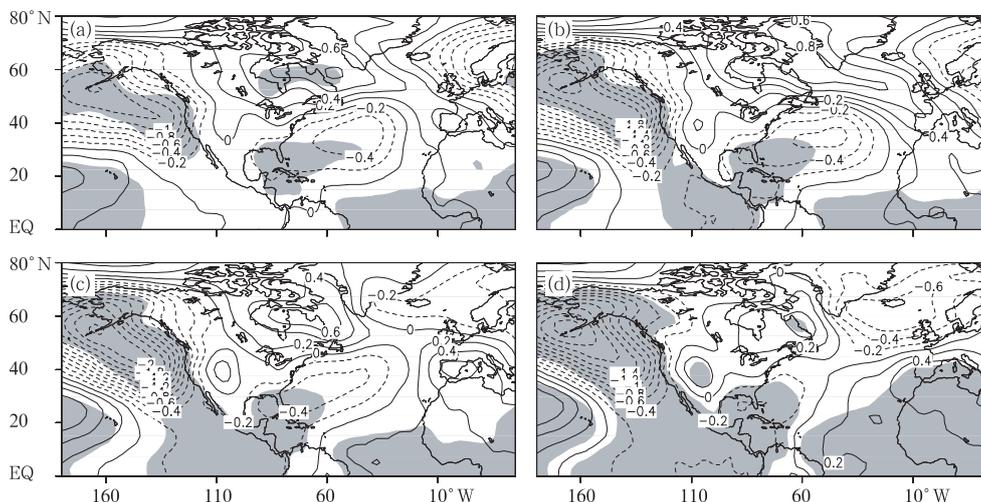


图 11 同图 7, 但为观测资料的结果

Fig. 11 Same as Fig. 7 but for the observation

4 结 论

利用一个全球海气耦合模式 BCM, 检验了模式对热带太平洋年际变率模态 ENSO 事件的模拟, 以此为基础, 讨论了热带太平洋强迫对北大西洋地区大气和海洋年际变率的影响, 主要结论如下:

(1) BCM 能够较为合理地模拟出赤道太平洋的年际变率模态, 及其对应的与 ENSO 相关联的全球海温距平型和大气遥相关型, 例如伴随赤道中东太平洋变暖所发生的热带印度洋和热带大西洋的增暖, 以及太平洋—北美遥相关型 PNA。BCM 在模拟 ENSO 事件上的不足, 一是 SST 正距平过于集中在赤道地区, 二是准 3 年的振荡周期分布过于规则。

(2) 北大西洋冬季海温的主导性变率模态, 即自北而南出现“—+—”的带状距平型, 显著地受到来自热带太平洋的强迫的影响, 具体表现为三核型 SST 距平指数与 Nino 指数存在显著的负相关。北大西洋 SST 年际变率对热带太平洋强迫的响应, 要滞后 2—3 个月, 其在 SLP 中的距平型, 沿太平洋—北美大陆表现为 PNA 型, 在北大西洋中高纬度, 它影响到大气涛动 NAO 的位相变化。

(3) 赤道中东太平洋对北大西洋三核型 SST 异常的强迫, 在实际观测资料中亦有反映, 但是这种强迫的具体 SLP 空间型和模式结果不尽相同。与北大西洋三核型 SST 距平正位相对应的 SLP 和 SST 变化, 在热带太平洋表现为弱但依然显著的 SO 正位相和冷事件。北大西洋三核型 SST 异常对

赤道太平洋强迫的响应滞后时间, 模式结果较之观测要偏短。与赤道太平洋暖事件对应的大气遥相关型, 在太平洋—北美地区表现为 PNA 型, 在北大西洋中高纬度, 它类似 NAO 的负位相、但与标准的 NAO 模态有别。

致谢: 本文部分工作系第一作者在挪威南森环境与遥感研究中心 (NERSC) 访问期间完成。作者对 Ola M. Johannessen 教授的邀请表示感谢。

参考文献

- [1] Latif M, Anderson D, Barnett T, et al. A review of the predictability and prediction of ENSO. *J Geophys Res*, 1998, 103 (C7): 14375-14393
- [2] Stockdale T N, Busalacchi A J, Harrison D E, et al. Ocean modeling for ENSO. *J Geophys Res*, 1998, 103 (C7): 14325-14355
- [3] Neelin J D, Battisti D S, Hirst A C, et al. ENSO theory. *J Geophys Res*, 1998, 103 (C7): 14261-14290
- [4] Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. *J Geophys Res*, 1998, 103 (C7): 14241-14259
- [5] Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, et al. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J Geophys Res*, 1998, 103 (C7): 14291-14324
- [6] Rogers J C. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 1999-2015
- [7] Fraedrich K. An ENSO impact on Europe—A review. *Tel-*

- lus, 1994, 46 A: 541-552
- [8] Osborn T J, Briffa K R, Tett S F B, et al. Evaluation of North Atlantic Oscillation as simulated by a coupled climate model. *Climat Dyn*, 1999, 15: 685-702
- [9] Stephenson D B, Pavan V. How well do coupled climate models simulate the North Atlantic Oscillation? *Climat Dyn*, 2003, 20: 381-399
- [10] Van Loon H, Madden R A. The Southern Oscillation. Part I: Global association with pressure and temperature in the northern winter. *Mon Wea Rev*, 1981, 109:1150-1162
- [11] Fraedrich K. European gross wetter during the warm and cold extremes of the El Nino/ Southern Oscillation. *Int J Climatol*, 1990, 10: 21-31
- [12] Fraedrich K, Muller K, Kuglin R. Northern hemisphere circulation regimes during the extremes of the El Nino/Southern Oscillation. *Tellus*, 1992, 44A: 33-40
- [13] Kiladis N, Diaz H F. Global climatic anomalies associated with extremes of the Southern Oscillation. *J Climat*, 1989, 2: 1069-1090
- [14] Fraedrich K, Muller K. Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes. *Int J Climat*, 1992, 12:25-31
- [15] Halpert M S, Ropelewski C F. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J Climate*, 1992, 5: 577-593
- [16] Wilby R L. Evidence of ENSO in the synoptic climate of the British Isles since 1880. *Weather*, 1993, 48: 234-239
- [17] Rodo X, Baert E, Comin F. Variations in the seasonal rainfall in Southern Europe during the present century: Relationship with the North Atlantic Oscillation and the El Nino-Southern Oscillation. *Climate Dyn*, 1997, 13: 275-284
- [18] Grotzner A, Latif M, Dommenges D. Atmospheric response to sea surface temperature anomalies during El Nino 1997/98 as simulated by ECHAM4. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 2175-2198
- [19] Dong B W, Sutton R T, Jewson S P, et al. Predictable winter climate in the North Atlantic sector during the 1997-1999 ENSO cycle. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 985-988
- [20] Pozo-Vazquez D, Esteban-Parra M J, Rodrigo F S, et al. The association between ENSO and winter atmospheric circulation and temperature in the North Atlantic region. *J Climate*, 2001, 14: 3408-3420
- [21] Lau N C, Nath M J. Impact of ENSO on SST variability in the North Pacific and North Atlantic: Seasonal dependence and role of extratropical sea-air coupling. *J Climate*, 2001, 14: 2846-2866
- [22] Giannini A, Kushnir Y, Cane M A. Interannual variability of Caribbean rainfall, ENSO and the Atlantic Ocean. *J Climate*, 2000, 13: 297-311
- [23] Giannini A, Cane M A, Kushnir Y. Interdecadal changes in the ENSO teleconnection to the Caribbean region and the North Atlantic Oscillation. *J Climate*, 2001, 14:2867-2879
- [24] Lau N C, Nath M J. A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere-ocean system. *J Climate*, 1994, 7: 1184-1207
- [25] Lau N C, Nath M J. The role of the "atmospheric bridge" in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies. *J Climate*, 1996, 9:2036-2056
- [26] Lau N C. Interactions between global SST anomalies and the midlatitude atmospheric circulation. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 21-33
- [27] Latif M, Grotzner A. The equatorial Atlantic Oscillation and its response to ENSO. *Climate Dyn*, 2000, 16: 213-218
- [28] Saravanan R, Chang P. Interaction between tropical Atlantic variability and El Nino-Southern Oscillation. *J Climate*, 2000, 13:2195-2216
- [29] Li Z X. Influence of tropical Pacific El Nino on SST of the Southern Ocean through atmospheric bridge. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3505-3508
- [30] Rajagopalan B, Kushnir Y, Tourre Y. Observed decadal midlatitude and tropical Atlantic climate variability. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 3967-3970
- [31] Watanabe M, Kimoto M. Tropical-extratropical connection in the Atlantic atmosphere-ocean variability. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 2247-2250
- [32] Robertson A W, Mechoso C R, Kim Y J. The influence of the Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation. *J Climate*, 2000, 13: 122-138
- [33] Furevik T, Bentsen M, Drange H, et al. Description and evaluation of the Bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM. *Climate Dyn*, 2003, 21(1): 27-51
- [34] 周天军. 全球海气耦合模式中热盐环流对大气强迫的响应. *气象学报*, 2003, 61(2): 164-179
Zhou Tianjun. Adjustment of the North Atlantic thermohaline circulation to the atmospheric forcing in a global air-sea coupled model. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2003, 61(2): 164-179
- [35] 周天军, 字如聪. 北大西洋年际变率的海气耦合模式模拟 I: 局地海气相互作用. *气象学报*, 2006, 64(1): 1-17
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Gao Yongqi, and Helge Drange. Ocean-atmosphere coupled model simulation of North Atlantic interannual variability--Part I: Local air-sea interaction. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2006, 64(1): 1-17
- [36] Zhou Tianjun, Yu Rucong, Li Zhaoxin. ENSO-dependent and ENSO-independent variability over the mid-latitude North Pacific: Observation and air-sea coupled model simulation. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19: 1127-1147
- [37] Torrence C, Compo G P. A practical guide wavelet analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(1): 61-78
- [38] 龚道溢, 王绍武. 南极涛动. *科学通报*, 1998, 43(3): 296-301

- Gong Daoyi and Wang Shaowu. Antarctic Oscillation: Concept and Applications. Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (9):734-738
- [39] Silvestri G E, Vera C S. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. Geophys Res Lett, 2003, 30 (21), doi: 10. 1029/2003GL018277, 2003
- [40] Zhou T J, Yu R C. Sea surface temperature sea-surface temperature induced variability of the Southern Annular Mode in an atmospheric general circulation model. Geophys Res Lett, submitted
- [41] 周天军,宇如聪,李薇等. 20 世纪印度洋气候变率特征. 气象学报,2001, 59(3):257-270
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Li Wei, Zhang Xuehong. On the variability of the Indian Ocean during the 20 th century. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2001, 59(3): 257-270
- [42] Pan Y H, Oort A H. Correlation analyses between sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific and the world ocean. Climate Dyn, 1990, 4: 191-205
- [43] 周天军,俞永强,宇如聪等. 印度洋对 ENSO 事件的响应:观测与模拟. 大气科学,2004, 28(3):357-373
Zhou Tianjun, Li Zhaoxin, Yu Yongqiang, et al. Indian Ocean response to ENSO in IPSL air-sea coupled model. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(4): 313-330
- [44] Hastenrath S. Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies. Bull Amer Meteor Soc, 2002, 83 (5): 735-738
- [45] Timmermann A, Latif M, Voss R, et al. Northern Hemispheric interdecadal variability: A coupled air-sea mode. J Climate, 1998, 11:1906-1931
- [46] Zhou T J,Zhang X H, Yu R C. et al. The North Atlantic Oscillation simulated by Version 2 and 4 of IAP/LASG GOALS Model. Adv Atmos Sci,2000, 17(4):601-616
- [47] Hurrell J W. Influence of variations in extratropical winter-time teleconnections on Northern Hemisphere temperature. Geophys Res Lett, 1996, 23: 665-668
- [48] Hoerling M P, Hurrell J W, Xu T. Tropical origins for recent north atlantic climate change. Science, 2001, 292:90-92
- [49] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77: 437-471

OCEAN-ATMOSPHERE COUPLED MODEL SIMULATION OF NORTH ATLANTIC INTERANNUAL VARIABILITY II : TROPICAL TELE-CONNECTION

Zhou Tianjun¹ Yu Rucong¹ Gao Yongqi^{2,3} Helge Drange³

¹ LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² NZC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway

Abstract

The contribution of the tropical Pacific forcing to the North Atlantic interannual time scale variability is addressed by using the output of a global ocean-atmosphere coupled model namely Bergen Climate Model (BCM) in combination with the observational data. Evaluations on the simulated interannual variability of the equatorial and tropical Pacific sea surface temperature (SST) indicate that the BCM model has an acceptable performance in reproducing both the El Niño mode and the associated global SST anomalies and the atmospheric tele-connection patterns, although the simulated warm events have a prudish regular time period of approximately 3-year, which is a common problem for many ocean-atmosphere coupled models. Evidences from both the simulation and the observation all support that the dominant mode of the interannual time scale SST variability of the North Atlantic, appearing as a tri-polar pattern spanning the basin meridionally, is partly forced by the atmospheric tele-connections originated from the middle and eastern equatorial Pacific. Positive phase of the tri-polar North Atlantic SST mode corresponds to a cold event in the equatorial Pacific. In other words, the occurrence of an equatorial Pacific warm event can provoke a Pacific-North American tele-connection pattern (PNA) over the Pacific-North America domain, which further modulates the sea level pressure (SLP) change over the North Atlantic. The SLP anomaly pattern partly resembles the situation of a negative phase of the NAO. Since a strong NAO is always associated with a robust tri-polar structure SST anomaly pattern, the weakened NAO pattern accordingly leads to weaker tri-polar SST anomalies. Further analyses prove that the response of the North Atlantic SST to the equatorial Pacific forcing has a lag time of 2–3 months. Both the model simulation and the observation support this time-ag estimation.

Key words: North Atlantic, Interannual variability, Equatorial and tropical Pacific, Atmospheric tele-connection, Ocean-atmosphere coupled model.