副热带东北太平洋海表温度异常的传递及与 ENSO 的联系

王梦阳[1, 2, 3, 4, 5], 郑 建[1, 3, 4, 5], 杨宇星[1, 3, 4, 5], 王法明[1, 2, 3, 4, 5]

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266071; 5. 中国科学院大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)现象是地球气候系统中最主要的年际变化信号之一, 对其形成机制和预报的研究具有重要的理论和现实意义。本文基于 ERSST v4 海表面温度资料与 NCEP/NCAR Reanalysis 大气再分析资料, 通过回归分析与合成分析等方法, 研究了副热带东北太平洋海区海表面温度(sea surface temperature, SST)异常信号的传递机制及其与 ENSO 现象的联系。诊断结果表明, 副热带东北太平洋 SST 异常与 ENSO 指数有很好的正相关关系。副热带东北太平洋 SST 异常的暖信号超前于 ENSO 指数约半年时间, 通过风-蒸发-海温的反馈机制, 沿东北-西南方向向赤道中太平洋缓慢传递。更进一步的数值实验显示, 副热带东北太平洋的正 SST 异常信号的确可以影响大气环流场, 使其西南方向的海面风速减弱, 蒸发潜热通量减少, 从而使信号向西南方向传递。

关键词: 副热带; 海表面温度; ENSO; 热力学海气耦合; 风-蒸发-海温反馈

中图分类号: P47　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)04-0001-08

DOI: 10.11759/hykx20171010001

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO), 是指热带太平洋中东部的海表面温度(sea surface temperature, SST)以 2~8 a 为周期的波动现象[1]。ENSO 是地球气候系统中最强的年际波动信号, 热带太平洋的 SST 会对大气环流系统进行调制, 进而影响到全球气候[2]。因此, 对于 ENSO 的物理机制以及预报的研究具有重要的现实意义。

最早对 ENSO 物理机制的解释源自 Bjerknes[3], 他提出的“信风张弛”理论认为, 赤道太平洋上空的风速与海盆东西两端的海表面温度梯度之间存在正反馈的关系: 减弱的信风将导致冷舌区的冷水上翻作用的减弱, 进而导致赤道东太平洋海面增暖, 随后减小的海表面温度东西梯度将进一步使信风减弱。“信风张弛”理论很好地解释了厄尔尼诺与拉尼娜事件在发展过程中的物理机制。其后的研究者发现 ENSO 暖事件与冷事件的循环与赤道太平洋的温跃层深度/热容量有着密切联系。Suarez 等[4]提出的“延迟振子”理论指出, 赤道太平洋温跃层的波动的传播是引起 ENSO 相位转换的物理机制。Zebiak 等[5]开始使用约化重力的海洋模式与大气模式耦合来进行 ENSO 的预报。

近年来的研究表明热带以外的信号对 ENSO 的形成同样有着重要影响。Vimont 等[6-10]提出的季节足迹机制(Seasonal Footprinting Mechanism, SFM)认为, 北半球冬季的海面风速异常会改变海洋上混合层温度, 并在之后的春夏季通过风-蒸发-海温机制传递到热带, 从而对 ENSO 造成影响。Ping Chang 等[11]提出了太平洋经向模态(Pacific Meridional Mode, PMM), 认为热带外的信号可以通过该模态(热力学海气耦合过程)影响到 ENSO, PMM 可以作为 ENSO 的前兆因子, 在 ENSO 的预报中可以发挥重要作用。Wang[12]提出了热力学耦合模态的理论解, 解释了经向模态的物理机制。Zhang 等[13]提出了南太平洋经向模态, 并研究了其与 ENSO 的联系。

基于前人的研究, 北太平洋热带外的信号影响到热带的过程中, 都要通过副热带东北太平洋这一

收稿日期: 2017-10-01; 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11010102); 国家自然科学基金项目(41176035, 41421005, 41606018); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406402)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA11010102; National Natural Science Foundation of China, No.41176035, No.41421005, No.41606018; NSFC-Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers, Grant No.U1406402]

作者简介: 王梦阳(1988-), 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学研究, 电话: 0532-82896750, E-mail: mywang88@qq.com; 王法明, 通信作者, 研究员, 主要从事气候动力学、海气耦合等方面的教学与研究, 电话: 0532-82898933, E-mail: faming_wang@qdio.ac.cn

“通道”，本文针对副热带东北太平洋海区的 SST 异常信号所产生的影响进行了一系列更深入研究。在本文中，我们将首先介绍所使用的数据集和对数据的处理分析方法，对所使用的数值模式 CAM3-GRGO 进行必要的简介，继而展示对再分析资料的诊断结果和相关热力学海气耦合物理过程的分析，最后，为进一步验证诊断结果，并更好分析副热带东北太平洋 SSTA 引起的影响，我们设计了一系列专门的数值实验，并对实验结果进行了系统的分析讨论。

1 资料和方法

本文所使用的 SST 资料为美国国家海洋和大气管理局(National Ocean and Atmosphere Administration, NOAA)发布的扩展重建海表面温度第 4 版[14-15] (ERSST v4)。使用的大气资料为美国国家环境预报中心发布的再分析数据[16](NCEP/NCAR Reanalysis 1)，其中包括海表面气压(Sea Level Pressure, SLP)、热通量(各项)、海表面风速等。海表面温度与大气资料均为月平均值(Monthly Mean)，本文截取了 1948—2016 年的数据进行分析。

首先对所有资料进行了线性去趋势处理，得到去趋势的月平均数据。在此基础上，令数据自减其所在月份的历史平均(气候态平均)值，获得该物理量的月异常序列，即 Monthly Anomaly。对月异常序列进行带通滤波处理，滤掉了各物理量的 3 个月以内以及 10 a 以上的变化信号，使其主要体现年际时间尺度上的变化。本文中也用到了标准化的月异常数据，将月异常数据除以其所在月份的历史标准差，得到标准化的月异常数据，它将有效突出部分物理量的异常值，例如热带外的海表面温度异常(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)。

本文所使用的主要分析方法为回归分析、相关分析以及合成分析。回归分析主要指将某物理量的时空场投影到到一个标准化的时间序列，以获得二者相联系的空间模态。如果该物理量场也做了标准化处理，则得到其相关系数的空间结构。如果两个序列的各个数值的时间坐标一致相差一个特定的值，如数个月，则称为超前/滞后回归投影。合成分析主要指对依据某标准选取出的一组物理量求平均，以体现满足该标准的物理量场的共性，其结果既可以是合成的空间结构，也可以是合成的时间序列。

2 模式实验设置

本文所使用的数值模式为 CAM3-GRGO 全球海气耦合模式。模式的大气部分为美国国家大气研究中心发布的 Community Atmosphere Model 3.0。模式的海洋部分为一个全球约化重力(Reduced Gravity)海洋模式，基于 Zebiak 等[5]开发的一层半海洋模式。约化重力海洋模式可以模拟热带海洋上温跃层的波动，从而能够有效地对 ENSO 现象进行模拟。在热带以外，模式将海洋设置为一层“气候态混合层”，主要通过表面的热通量与动量通量与大气模式耦合在一起。主要的模式实验包括:

1) 控制实验: 在不施加外界影响的情况下令模式自由演变 100 a。控制实验期间模式将在每年特定时间输出完整的用于模式热启动的海洋和大气数据。

2) SSTA 实验: 将控制实验输出的每年 1 月 1 日零时的海洋和大气数据作为初始条件，在不施加外界影响的情况下令模式开始自由演变，待模式自由演变到特定时间，令选定海区的 SST 自加一个数值，即对模式海洋施加一个 SSTA，然后令模式继续自由演变 1 a，并将海气系统主要物理量的结果输出，作为 SSTA 实验的结果。

控制实验与 SSTA 实验的唯一区别为所施加的 SSTA，因此，SSTA 实验与控制实验之差，一定程度上代表了(该次试验中)模式海气系统对所施加的 SSTA 的响应。而将一整组各个不同年份(不同初始/背景场下)的响应进行合成，可获得模式海气系统对所施加的 SSTA 的响应的一般情形。SSTA 实验的设计与前文提到的 SFM 以及 PMM 的研究者所设计的实验方案相比有较大差异: 上述研究中的海气耦合模式实验主要采取对海洋施加持续的潜热通量强迫的手段，可以有效反映海洋对大气的响应，而本文所设计的的 SSTA 实验则更能反映出海洋影响大气的过程，更好地验证热力学海气耦合中 SST 的作用。

3 结果和分析

3.1 对再分析资料的诊断结果

首先对 ENSO 暖事件期间的标准化 SSTA 进行了合成分析。初步分析显示，副热带东北太平洋的 SSTA 与赤道中太平洋联系更加紧密，因此以 Niño 4 指数作为表征 ENSO 的指标。使用相同方法，但以 Niño 3 指数与 Niño 3.4 指数作为表征 ENSO 的指标进行的合成分析也显示出基本一致的结果。赤道中东太平洋的 SSTA 变化幅度往往是远大于赤道外的，因此使用标准化的 SSTA 能更好地体现赤道外的

SSTA 信号。由于 ENSO 暖事件的峰值主要集中于北半球冬季，本文将每次 ENSO 暖事件看作 2 a(即发展年与衰退年)，对历次暖事件期间各月份的标准化 SSTA 取平均，得到合成分析的结果。

由图 1 可见，在合成的 Niño 4 暖事件的发展年的北半球春夏季，副热带东北太平洋(夏威夷以东到夏威夷以南附近)海区存在明显的暖 SSTA。合成的暖 SSTA 呈东北-西南方向的空间结构，沿东北信风的方向，一直延伸至赤道中太平洋，即 Niño 4 海区。逐月的合成分析结果显示，该海区的暖 SSTA 信号自 3 月份就已经开始出现。

在合成分析的基础上，为进一步确定副热带东北太平洋 SSTA 与 ENSO 的联系，及其空间范围和结构，对标准化的 SSTA 场进行了超前滞后回归(相关)分析。如图 2 所示，Niño 4 海区的 SSTA 与超前它 9 个月的副热带东北太平洋海区 SSTA 有显著的相关性，SSTA 投影的正值区域由副热带东北太平洋向西南方向一直延伸至赤道中太平洋。

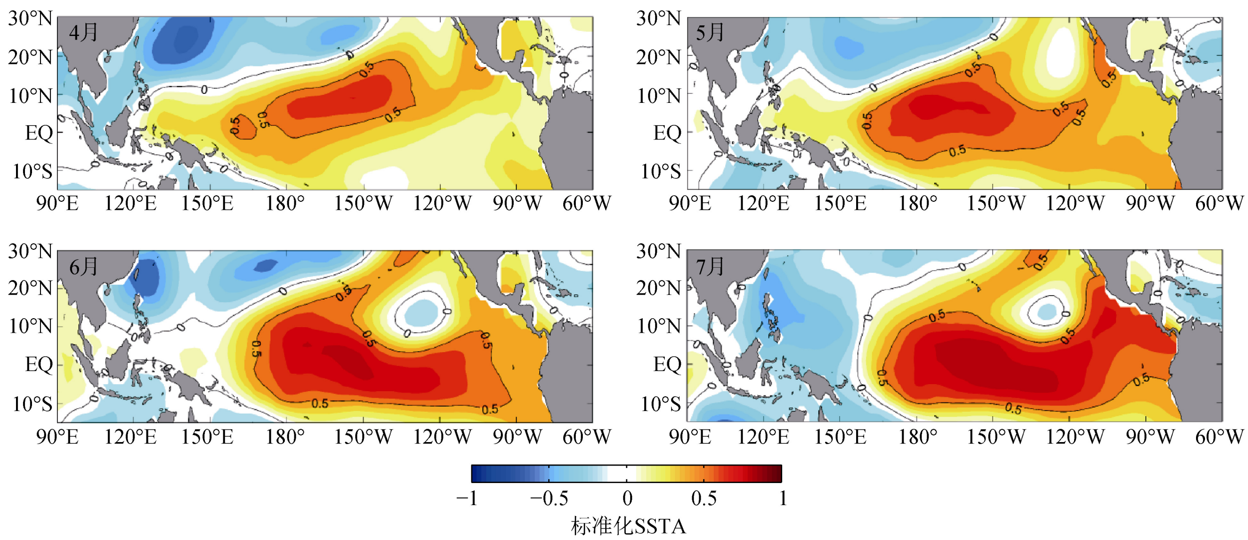

图 1　合成的 19 次 Niño 4 信号的暖事件发展年的 4、5、6、7 月份标准化 SSTA

Fig. 1　Standardized synthesized SSTA of April, May, June, and July during 19 warm events of Niño 4 index

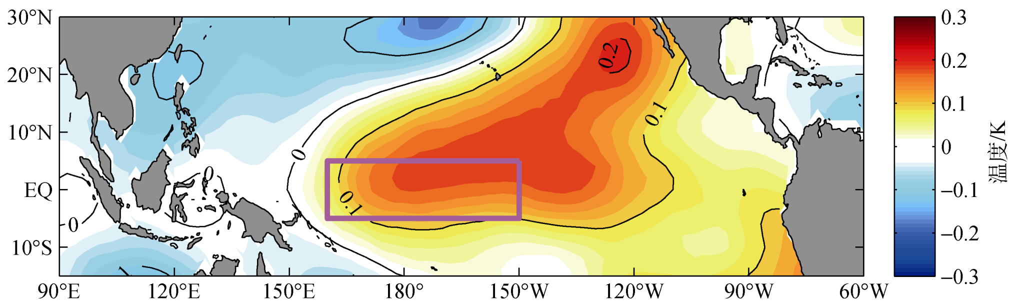

图 2　超前 9 个月的 SSTA 场在标准化的 Niño 4 指数上的投影

Fig. 2　Regression of 9-month-leading SSTA on standard Niño 4 index

紫色方框: Niño 4 海区

purple box: the Niño 4 region

根据 ENSO 暖事件合成分析结果与 Niño 4 指数的投影，我们选取了 150°~130°W, 15°~25°N 以内的区域作为关键区域，代表“副热带东北太平洋”海区。对该范围内的各个物理量场取平均值用以表征该海区的主要物理特征的变化，如“副热带东北太平洋 SSTA”。进一步的分析显示，将选取区域的范围纬向调整 10°以内，经向调整 5°以内，所得结果基本一致。

相关分析显示副热带东北太平洋 SSTA 的确有向赤道中太平洋传递的趋势，如图 3，以紫色方框区域的平均 SSTA 表征副热带东北太平洋 SSTA，其滞后相关系数的显著区域自西北向东南一直延伸至赤道中太平洋，呈现出与图 2 中 Niño 4 指数的超前投影基本一致的空间结构。这一结果再次印证了副热带东北太平洋 SSTA 超前于 ENSO 的正相关关系。

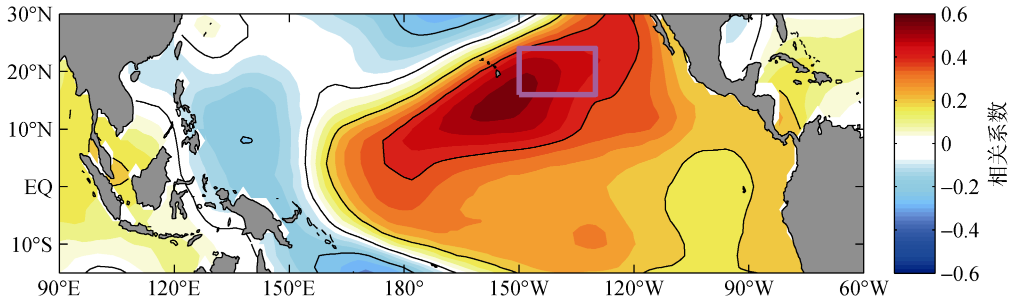

图 3 副热带东北太平洋所选区域平均 SSTA 与滞后其 6 个月的 SSTA 场的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient between mean SSTA time series and 6-month-lagging SSTA field in selected area of subtropical northeastern Pacific

依据副热带东北太平洋 SSTA 时间序列(经滤除年代际变化, 3 个月滑动平均处理, 标准化处理), 将春夏两季 SSTA 信号超出其标准差的年份认定为一次“暖事件年”, 在 69 a 间, 共判定出“暖事件年”约 19 个。这期间的冬季 Niño 4 指数超出其标准差的年份是 19 次左右, 将两者进行对照发现, 共有 10 次副热带东北太平洋春夏季 SSTA 的暖事件之后发生了 Niño 4 型暖事件。

考虑到信号与两类 ENSO 分布型(东部型与中部型)可能会有不同的联系, 本文对此也进行了比对。结果显示副热带的“暖事件年”与两类 ENSO 暖事件并没有显著的对应关系, 但是, 在 6 次与“暖事件年”向对应的 Niño 3 指数超过其标准差年份(共 14 a)中, 有 5 次 Niño 4 指数也超过了其标准差, 这暗示了副热带东北太平洋的 SSTA 暖信号先到达赤道中太平洋, 再沿赤道东传的过程。

将副热带东北太平洋的 SSTA 信号与赤道太平洋的 SSTA 联系起来的主要物理过程是热力学海气相互作用机制。热力学海气相互作用是指海洋通过 SST 影响其上方的大气压的空间结构, 进而影响到周边区域的海面风场; 而改变后的海面风场通过调制海气界面的蒸发潜热通量, 最终重新作用于 SST, 使 SST 场发生缓慢的改变。这一物理过程还被称为风-蒸发-海温(Wind Speed-Evaporation-SST, WES)反馈机制[17]。

图 4 为副热带东北太平洋 SSTA 时间序列(紫色方框区域平均 SSTA)与其同期的海表面气压场和海面风场相关系数的分布图。本文所选区域的 SSTA 与东部和中部的副热带北太平洋海表面气压表现出明显的负相关关系, 所选区域正是异常低压中心所在, 其中心的相关系数可达–0.5。与之相对应, 低层异常风场显著流向低压中心, 低压中心的南侧为异常西南风, 经向和纬向海面异常风速的相关系数可分别达到 0.42 和 0.35。考虑到大气环流系统的复杂性以及 ENSO 等较强信号的干扰, 此相关系数一定程度上已经可以说明该区域 SSTA 是其附近大气环流场的主要影响因素。在更进一步的分析中发现, 其超前滞后 1~2 个月的投影结果同样表现出与同期分析一致的空间结构, 而使用 SSTA、SLPA、经向风异常、纬向风异常进行的主成分分析, 也得出基本一致的空间结构。

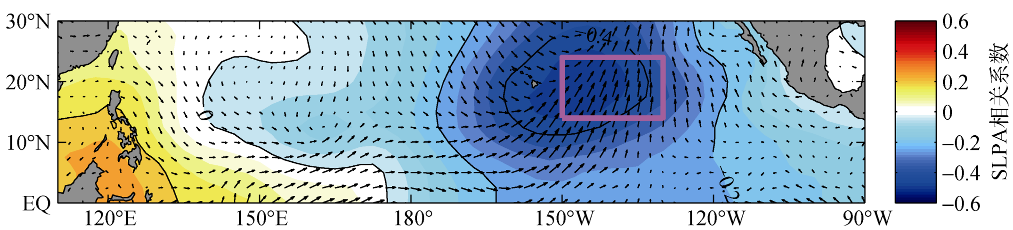

图 4 副热带东北太平洋所选区域 SSTA 与 SLPA 与海面风场的相关系数空间结构

Fig. 4 Correlation coefficient between SSTA, SLPA (shaded), and sea surface wind speed (vectors) in selected area of subtropical northeastern Pacific Ocean

副热带东北太平洋海区以及其西南方向延伸的区域盛行东北信风, 信风的方向大致与图 4 中该区域呈相反的方向, 因此正的 SSTA 对应着其西南方向的海面上空的信风的减弱。减弱的信风将使其下方海气界面处的蒸发与混合的物理过程减慢, 从而起到使 SST 缓慢升高的作用。

图 5 显示了所选区域(紫色方框所示)SSTA 时间序列与同期的潜热通量场的相关系数的空间结构，暖色表示正的向下潜热通量异常。该区域西南方向的海面由于信风的减弱，使得蒸发减少，海洋通过潜热释放向大气的热量减少，海水被缓慢加热；而东北和东南方向的海面则失去更多的热量。在这种结构的潜热通量的作用下，该海区的正的 SSTA 信号会呈现出向西南方向，往赤道中太平洋传递的趋势。

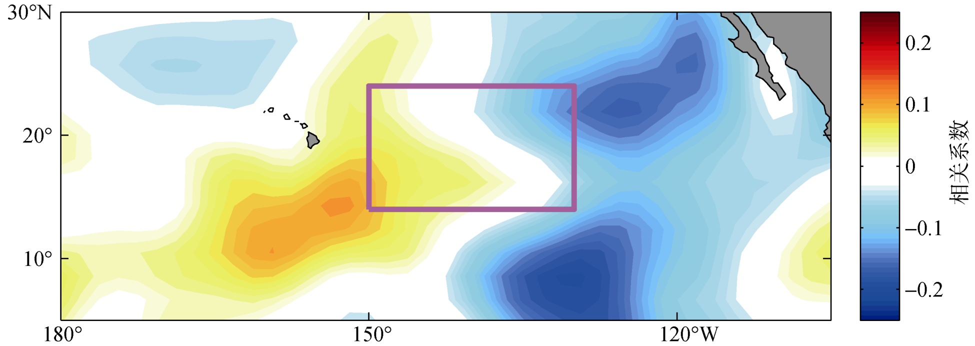

图 5　所选区域平均 SSTA 与潜热通量场的相关系数

Fig. 5　Correlation coefficient between the mean SSTA and latent heat flux of selected area

在相关海区进行了上层海水的热收支分析，结果显示海气界面的(蒸发)潜热通量，是海水温度方程中在年际时间尺度上波动最大的一项，其振幅可达到净热通量振幅的 70%以上，而同时，潜热通量与海气界面的总净热通量的变化基本一致(相关系数达 0.9)，基本可以代表海面净热通量。由此证明，在副热带，海面风速通过调制海气界面的蒸发速率，影响着潜热通量，继而引起海表面温度变异。

进一步确认海温和潜热通量变异的演变规律，本文依据 Niño 4 指数选择出暖事件年，对两年期间的 Niño 4 指数、副热带东北太平洋 SSTA、海面风速异常、潜热通量异常的时间序列进行了合成分析。如图 6，合成的副热带东北太平洋 SSTA 极大值出现于 ENSO 发展年的 5、6 月份前后，约超前于 ENSO 盛期(12 月份前后)半年。在合成的北半球的冬季，首先出现的是信风减弱与同步的蒸发减少信号，这导致 SSTA 开始出现上升趋势。在合成的北半球春夏季，SSTA 逐渐达到极大值，而此时导致 SSTA 上升的信风与潜热信号也逐渐减弱。而在此后，潜热作用减弱，使副热带 SSTA 开始逐渐回落。

此外，图 6 在一定程度上说明了副热带东北太平洋 SSTA 的产生原因：北半球冬季信风的减弱，而这主要与北半球大气环流系统内部的年际波动相关。在本文以外，我们对此进行了进一步的研究。研究发现，北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)的南低北高的相位很好地对应了副热带 SSTA 信号以及海表面风场和潜热通量场的空间结构，同时 NPO 的最大振幅也出现于北半球的冬季，与图 6 中的合成海面风速及潜热通量时间一致，更系统的分析将在后续的研究中进行。

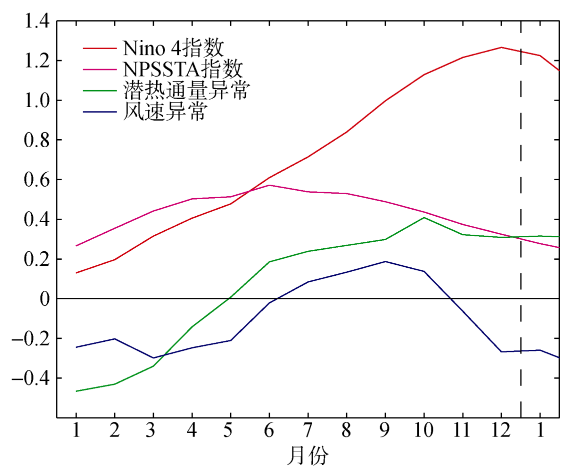

图 6　合成的 Niño 4 暖事件发展年副热带东北太平洋标准化 SSTA、海面风速异常、以及潜热通量异常的时间序列

Fig. 6 Time series of standardized synthesized SSTA , sea surface wind speed, upward latent heat flux, and Niño 4 index in subtropical northeastern Pacific in Niño 4 index warm events

综上所述，副热带东北太平洋 SSTA 信号与赤道中太平洋有显著联系：在时间上，信号超前 Niño 4 指数约半年左右，春夏季的副热带暖事件与冬季的 ENSO 暖事件有较好的对应关系；在空间上，SSTA 信号的传递显示出东北-西南方向的空间结构。初步的分析显示，风-蒸发-海温机制可能在信号传递的

过程中发挥了作用，与SSTA信号相关的海表面风场与潜热通量场有利于信号向西南方向的传递。

3.2 模式实验结果

为了验证上述的诊断结果，本文通过模式实验进行了进一步的研究。实验的具体设置为：在每个单独的SSTA实验运行至该年4月1日时，于图7所示区域施加1℃的SSTA，而后令模式继续自由演变。对主要的物理量，求取每个SSTA实验与对应的控制实验之差，并将一组(30个)实验结果进行合成分析。

如图8，在施加后的一个月间，模式海气系统将在其西南方向(东北信风的下风区)形成与气候态(东北信风)方向相反的异常风场，即SSTA的产生很快导致了西南方向海面风速的减弱。信风减弱的直接结果是其下方海面的(向上)潜热通量减少，最终西南方向的SST将开始缓慢增暖。而最初施加SSTA的海区由于无法一直维持超出气候平均态水平的SST，将通过潜热和长波等方式缓慢冷却。如图7，施加正SSTA的海区的暖异常将逐渐减弱，而其西南方向的SST将逐渐增暖，最终体现为SSTA信号通过风-蒸发-海温的反馈机制，由副热带东北太平洋海区向西南方向的赤道中太平洋传递。

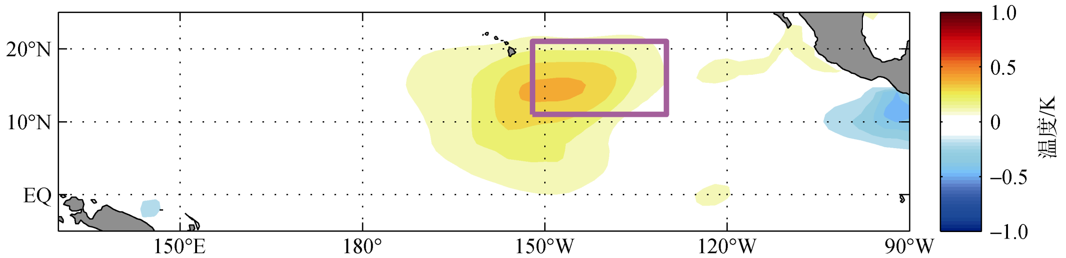

图7 合成的施加扰动后一个月SSTA实验与控制实验的月平均SST之差

Fig. 7 Difference in the synthesized monthly mean SST between SSTA experiments and control experiment one month after the SSTA signal was set

紫色方框：施加SSTA扰动的区域

Purple box: the area where the SSTA signal is set

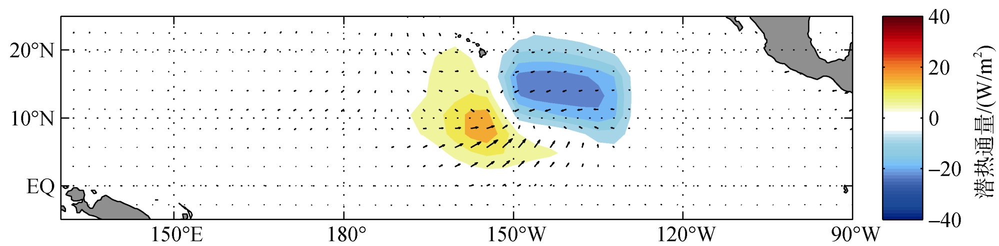

图8 合成的施加扰动后一个月SSTA实验与控制实验的海面风场与潜热通量(W/m^2)之差

Fig. 8 Difference in the composite monthly mean sea surface wind speed (vectors) and latent heat flux (shaded, W/m^2) between SSTA experiments and control experiment one month after the SSTA signal was set

我们多次尝试调整了施加SSTA的强度(+0.2°, +0.5°, +1.0°, +1.5°)，空间范围与形状，以及时间提前或推后。所得出的结果与图7、图8基本一致，这表示图7、图8可以较好地反映出模式海气系统对副热带东北太平洋SSTA的响应形式。

4 结论

本文通过对再分析资料的诊断分析以及模式实验，研究了副热带东北太平洋SSTA对ENSO的影响，研究结果表明：副热带东北太平洋SSTA与滞后半年赤道中东太平洋SSTA存在显著的正相关关系。对ENSO事件年的标准化SSTA合成分析，以及根据SSTA判别得出的副热带暖事件年对照，都显示两者有着一定的对应性，即ENSO事件的第一年春夏季，副热带东北太平洋常常出现正的SSTA信号。

副热带东北太平洋SSTA可以通过风-蒸发-海温的热力学海气耦合过程，向西南方向的赤道中太平洋传递。SSTA信号的时间序列在气压场、海面风场、潜热通量场上的投影揭示了其物理过程：暖的SSTA上方形成低压异常，使西南方向信风减弱，蒸发潜热通量减少，西南方向SST逐渐增暖，SSTA信号向西南方向传递。合成分析表明SSTA信号往往超前

ENSO 约半年多的时间。

模式实验验证了关于 SSTA 信号通过风-蒸发-海温反馈机制传递的分析结论，用更直观的方式展现了，产生于副热带东北太平洋的 SSTA，的确会通过热力学海气耦合过程向西南方向的赤道中太平洋传递。

SSTA 以及海面风等信号传递到热带后，将参与到热带海气耦合系统的物理过程中，对现有实验结果的分析，不足以支持更系统的诊断。如何改进模式实验，进一步验证信号传递到热带后的耦合过程，进而量化东北太平洋副热带 SSTA 对 ENSO 的影响，是一个十分有意义的问题，我们在以后的工作中继续探索。

参考文献:

[1] Kevin E, Trenberth. The Definition of El Niño[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78: 2771-2777.

[2] 赵振国. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响[J]. 大气科学, 1996, 20: 422-428.

[3] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections form the equatorial Pacific[J]. Monthly Weather Review, 1967, 97: 163-172.

[4] Suarez M J, Schopf P S. A delayed action oscillator for ENSO[J]. Journal of the Atmospheric Science, 1988, 45: 3283-3287.

[5] Zebiak S E, M A Cane. A Model El Niño-Southern Oscillation[J]. Monthly Weather Review, 1987, 115: 2262-2278.

[6] Vimont D J, D S Battisti, A C Hirst. Footpriting: A seasonal connection between the tropics and mid-latitudes[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28: 3923-3926.

[7] Vimont D J, Battisti D S, Hirst A C. The Seasonal Footprinting Mechanism in the CSIRO General Circulation Models [J]. Journal of Climate, 2003, 16: 2653-2667.

[8] Vimont D J, Wallace J M, Battisti D S. The Seasonal Footprinting Mechanism in the Pacific: Implications for ENSO[J]. Journal of Climate, 2003, 16: 2668-2675.

[9] Vimont D J, Alexander M, Fontaine A. Midlatitude excitation of tropical variability in the Pacific: The role of thermodynamic coupling and seasonality[J]. Journal of Climate, 2009, 22: 518-534.

[10] Alexander M, Vimont D J, Chang P, et al. The Impact of Extratropical Atmospheric Variability on ENSO: Testing the Seasonal Footprinting Mechanism Using Coupled Model Experiments[J]. Journal of Climate, 2010, 23: 2885-2901.

[11] Ping Chang, Zhang L, Saravanan R, et al. Pacific meridional mode and El Niño-Southern Oscillation[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: L16608.

[12] Wang Faming. Thermodynamic Coupled Modes in the Tropical Atmosphere–Ocean: An Analytical Solution[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2010, 67: 1667-1677.

[13] Zhang Honghai, Clement A, Nezio P D. The South Pacific Meridional Mode: A Mechanism for ENSO-like Variability[J]. Journal of Climate, 2014, 27: 769-783.

[14] Huang Boyin, Banzon V F, Freeman E, et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and Intercomparisons[J]. Journal of Climate, 2015, 28: 911-930.

[15] Liu Wei, Huang B, Thorne P W, et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4): Part II. Parametric and Structural Uncertainty Estimations[J]. Journal of Climate, 2015, 28: 931-951.

[16] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77: 437-471.

[17] Wang Chunzai, Weisberg R H, Yang H. Effects of the Wind Speed–Evaporation–SST Feedback on the El Niño–Southern Oscillation[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56: 1391-1403.

Propagation of the Subtropical Northeastern Pacific SSTA and Its Correlation with ENSO

WANG Meng-yang[1, 2, 3, 4, 5], ZHENG Jian[1, 3, 4, 5], YANG Yu-xing[1, 3, 4, 5], WANG Fa-ming[1, 2, 3, 4, 5]

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 5. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Acadenny of Science, Qingdao 266071, China)

Received: Oct. 1, 2017
Key words: subtropical; SST; ENSO; thermodynamic; wind-evaporation-SST feedback

Abstract: This study analyzes the propagation of the subtropical northeastern Pacific sea surface temperature anomaly (SSTA) and its correlation with El-Niño and southern oscillation (ENSO). Based on the extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST v4) and the National Centers for Environmental Prediction/ the National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis dataset, regression analysis and synthesis analysis are carried out. The results show a positive correlation exists between the subtropical northeastern Pacific SSTA and ENSO. The subtropical northeastern Pacific SSTA leads ENSO by about six months, and propagates in the northeast-to-southwest direction to the equatorial central Pacific by the wind-evaporation-SST feedback. A series of model experiments are designed, which show that SSTA signals in the subtropical northeastern Pacific can actually influence the sea surface wind speed and latent heat flux fields, and then propagate to the southwest.

(本文编辑：李晓燕)