

ENSO 事件次表层海温的两个模态 及其对大气环流的影响*

陈永利^{1, 2, 3} 唐晓晖^{1, 2, 3} 王凡^{1, 2, 3, 4} 赵永平^{1, 2}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 青岛 266237; 4. 中国科学院大学海洋学院 青岛 266071)

摘要 利用 SODA 海洋同化资料和 NCEP 再分析大气资料, 分析了热带太平洋次表层海温异常(subsurface ocean temperature anomaly, SOTA)与厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)循环的联系, 及 SOTA 对大气环流的影响。回顾传统 ENSO 研究, 指出存在的问题, 提出了 ENSO 影响大气研究的新思路, 得到以下结果: (1) 以 SOTA 为基本资料的研究发现, ENSO 事件有两个模态, 主要出现在冬季的第一模态对冬季及夏季亚洲-北太平洋-北美地区上空中高纬大气环流有重要影响, 主要出现在夏季的第二模态对该地区上空夏季热带和副热带大气系统有重要作用。(2) ENSO 事件通过与 ENSO 相联系的热带太平洋海面温度异常(ENSO-related sea surface temperature anomaly, RSSTA)对大气的异常热通量输送, 强迫 Walker 环流和 Hadley 环流变化, 导致热带和北太平洋及周边地区上空大气环流异常, 进而影响相关地区冬季和夏季的气候。(3) 海表面温度异常(sea surface temperature anomaly, SSTA)包含 RSSTA 和大气异常导致的海温变化(sea temperature anomaly caused by atmospheric anomaly, STA)两部分, RSSTA 是 ENSO 事件过程中海洋内部热动力结构调整导致的海面温度变化, 在海洋对大气的热输送过程中, 它随 ENSO 事件演变不断更新; STA 是大气受 RSSTA 海洋异常加热后导致的大气环流异常对海面温度的影响, 在海洋浅表层 STA 对 RSSTA 有重大影响。本文最后讨论了 ENSO 事件期间热带海洋对大气热输送过程, 指出 ENSO 事件通过海洋内部热动力结构调整产生 RSSTA, 它直接对大气异常加热, 导致大气环流和气候异常, 局地海气之间负反馈过程产生 STA, 反过来抑制 RSSTA。结果还指出, 人们常用的 SSTA 变率实际上主要由秋冬季节 RSSTA 主导, 丢失了春夏季 ENSO 信息, 用 SSTA 研究 ENSO 事件存在局限性, 这也可能是 ENSO 事件春季预报障碍的原因之一。

关键词 ENSO 事件两个模态; 海表面温度异常(sea surface temperature anomaly, SSTA); 次表层海温异常(subsurface ocean temperature anomaly, SOTA); 大气环流异常; 海气热通量边界过程

中图分类号 P731.27 doi: 10.11693/hyhz20200100028

20 世纪 60 年代以来, 人们对厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)形成机制及 ENSO 模的年际变率进行了大量研究(Diaz *et al.*, 2000; Timmermann *et al.*, 2018), 对 ENSO 事件本质的认识

逐步深入, 并提出了种种 ENSO 循环理论(Schopf *et al.*, 1988; Jin, 1997), 解释观测到的 ENSO 事件冷暖位相的持续和转换过程。观测事实和研究(李崇银, 2002; 巢纪平等, 2003)表明, ENSO 循环不仅是赤道太平洋

* 资助项目: 全球变化与海气相互作用专项, GASI-IPOVAI-01-01 号; 中国科学院战略性先导科技专项(B)类, XDB42000000 号; 国家自然科学基金重点项目, 41730534 号; 国家自然科学基金创新群体科学基金, 41421005 号; 国家自然科学基金委员会与山东省联合基金, U1406401 号。陈永利, 研究员, E-mail: ylchen@qdio.ac.cn

通信作者: 唐晓晖, 助理研究员, E-mail: tangxiaohui@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-01-20, 收修改稿日期: 2020-04-02

海表面出现的海洋大气现象,而且是涉及整个热带太平洋次表层的海气耦合事件。源于热带太平洋暖池的显著海洋次表层海温异常(subsurface ocean temperature anomaly, SOTA)沿赤道海洋温跃层由西向东传,在 ENSO 循环中起着重要作用。

长期以来,人们多采用海表面温度异常(sea surface temperature anomaly, SSTA)代表海洋热力结构异常来研究 ENSO 事件,但是 SSTA 与 SOTA 存在差异,无法准确反映海洋内部热力结构变化。在热带太平洋,北半球秋冬季气温下降、风速较大,海洋向大气输送热量,海洋表层水温下降,形成上冷下暖的不稳定温度层结,在较大风速的搅动下,SSTA 与 SOTA 变率基本一致;春夏季气温上升、风速较低,大气向海洋输送热量,海洋浅表层水温上升,形成上暖下冷的稳定温度层结,加之大气降水和云量的影响,SSTA 与 SOTA 变率很不一致。迄今的研究结果表明,基于 SSTA 资料的 ENSO 事件仅表现为主要出现在冬季的成熟期模态,其原因就在于缺失了夏季海洋次表层的信息。ENSO 事件对冬季气候的影响归因于冬季热带太平洋海洋热力结构的异常(Huang *et al.*, 2004),但由于缺少 ENSO 过渡期模态,ENSO 对夏季气候的影响也只能用冬季大气环流持续性来解释(Wang *et al.*, 2000)。

赵永平等(Zhao *et al.*, 2007)研究了热带太平洋温跃层深度的年际变率,发现 ENSO 事件有两个模态,二者组合构成 ENSO 循环,并由此提出了一个新的 ENSO 循环混合层水体振荡模型。他们指出,ENSO 循环的实质是由信风异常和海气耦合过程共同作用产生的海洋混合层水体在赤道与 12°N 之间热带太平洋海盆内的惯性振荡。陈永利等(陈永利等, 2010; Chen *et al.*, 2012, 2013)研究了热带太平洋 SOTA 年际一年代际变异特征、与 ENSO 循环的联系及对对中国气候的影响。这些研究结果为 ENSO 机制研究提供了新的思路。

本文的目的在于进一步深入研究 ENSO 事件次表层海温的两个模态中,与 ENSO 相联系的热带太平洋海面温度异常(ENSO-related sea surface temperature anomaly, RSSTA)和大气异常导致的海温变化影响大气环流的作用和过程,揭示 ENSO 事件对大气环流影响的物理机制。首先指出基于 SSTA 的 ENSO 研究可能存在的问题,然后简单介绍资料和处理方法;第二部分揭示和比较 SOTA 和 SSTA 的 ENSO 模态;第三部分分析 ENSO 两个模态对冬、夏

季大气环流的影响及机制,证实 ENSO 事件成熟期和过渡期两个模态的事实存在;第四部分讨论热带海洋 ENSO 事件期间的海气热输送特定界面过程;最后是结论。

1 资料和处理方法

本文采用简单海洋同化(CARTON-GIESE SODA2.0.2-4, 美国马里兰大学,源于 <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.CARTON-GIESE/.SODA/.v2p0p2-4>)次表层海温资料(0.5°×0.5°经度纬度网格)和 NCEP 再分析大气资料(2.5°×2.5°经度纬度全球网格,源于 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>),资料起讫时间为 1958 年 1 月—2007 年 12 月。基于次表层海温距平的最大值一般都出现在温跃层附近的观测事实(巢纪平等, 2003),首先用太平洋次表层 450m 以浅的海温距平方差最大值的深度曲面代表温跃层曲面,并用温跃层曲面上的海温距平计算得到 SOTA(详见陈永利等, 2010)。SOTA 为负值时,表示温跃层上抬,次表层海温下降;SOTA 为正值时,温跃层下降,次表层海温上升。对其进行 1a 低通滤波以去除年变化,获得 SOTA 年际变率。滤波过程中去除了长期趋势。对 NCEP 大气资料也进行 1a 低通滤波和去倾处理。在资料分析中,首先对热带太平洋 SOTA 进行经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析,得到 ENSO 事件次表层海温的两个模态,然后与大气环流场、SSTA 等物理量作联合 EOF 分析。在联合 EOF 分析中,通过控制相关物理量的量级,始终保持 SOTA 主导场地位,以确保计算得到的各相关物理量与 ENSO 呈同步变化。由此获得与 ENSO 事件两个模态相联系的 RSSTA 和北太平洋及周边地区上空异常大气环流场,后者捕捉 ENSO 事件的主要信息。通过分析热带太平洋 SOTA 与各相关物理量异常之间的关系及物理意义,剖析热带海洋热力结构异常对大气环流的影响及机制;通过分析热带太平洋各层海温异常的垂直演变,揭示 ENSO 期间热带太平洋次表层海洋对大气热量传输的特定边界过程。

2 热带太平洋 ENSO 事件次表层海温的两个模态

图 1a 和 b 为对热带太平洋 SOTA 进行 EOF 分析得到的首两个模态空间场,时间系数见图 1d。SOTA 前两个模态分别占总方差贡献的 31.0%和 15.4%。第

一模态主要特征为以 160°W 为纵轴的东西向 SOTA 偶极子分布, 第二模态主要特征是以 6°—8°N 为横轴的南北向准对称 SOTA 跷跷板分布。第一模态表征了 ENSO 成熟期 SOTA 分布, 时间系数为正时为 El Niño 事件, 时间系数为负时为 La Niña 事件。第二模态代表了 ENSO 过渡期 SOTA 分布, 时间系数为正时为 El Niño 事件衰退期或 La Niña 事件发展期, 时间系数为负时反之。热带太平洋 SOTA 前两个特征向量场时间系数均方差变化表明, ENSO 成熟期主要出现在冬半年, 9 月—次年 1 月最多, ENSO 过渡期主要出现在夏半年, 6—8 月最多。谱分析结果(图 1e)表明, 第

一和第二模态均具 56 和 44 个月两个显著 ENSO 周期, 第二模态与第一模态有 9 个月的滞后相关, 相关系数达 0.72, 二者组合构成 ENSO 循环。此外, 两个模态还具有年代际长周期振荡。

图 1c 为 ENSO 事件 SSTA 第一模态, 主要出现在冬半年, 占 SSTA 总方差贡献 53.0%。SSTA 第二模态(图略)占总方差贡献 11.1%, 其时间变率与典型的 ENSO 事件(以 Nino3 指数为表征)无显著相关, 其时间系数均方差表明, SSTA 两个模态极大值均出现在冬半年。显然, 用 SSTA 作指标, 只能得到 ENSO 事件冬季成熟期一个模态, 丢失了 ENSO 事件夏季过渡期信息。

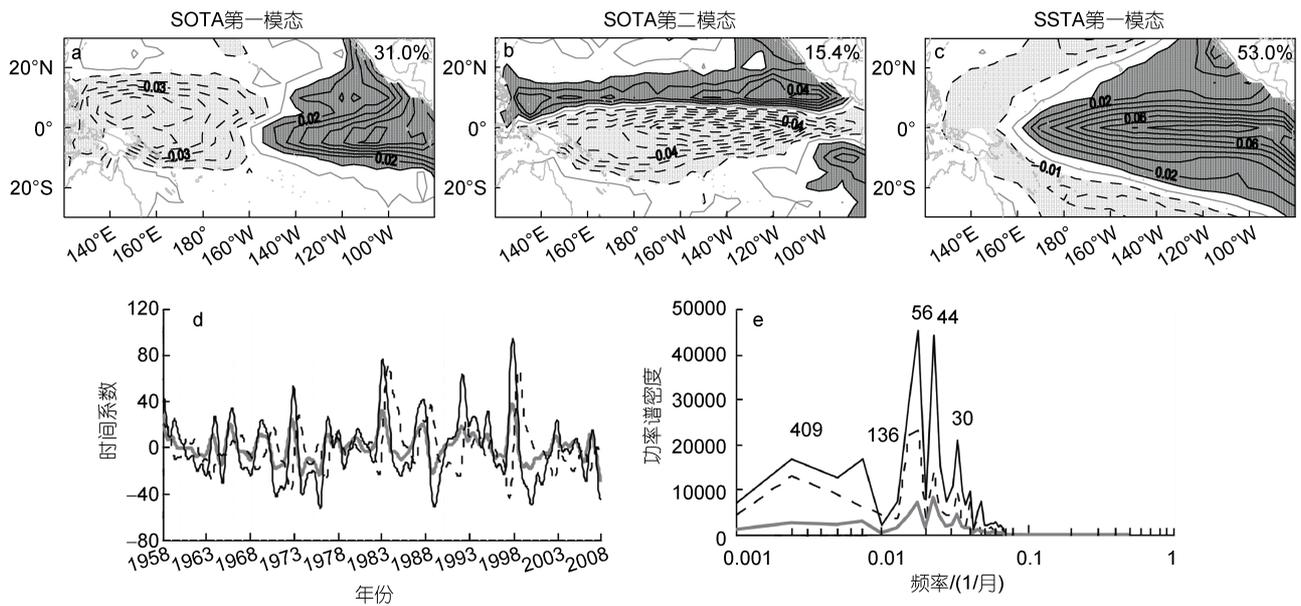


图 1 次表层海温异常(SOTA)第一(a)、第二(b)模态和海表面温度异常(SSTA)第一模态(c)及相应时间系数(d)与谱密度分布(e)

Fig.1 The 1st(a), 2nd (b) EOF modes of subsurface ocean temperature anomaly (SOTA), the 1st EOF mode of sea surface temperature anomaly (SSTA)(c), and their corresponding time coefficients(d) and power spectrum densities(e)

注: a, b 和 c 中: 实线和深灰色填充表示正值, 虚线和浅灰色填充表示负值, 粗灰线表示 0, 等值线间隔为 0.01°C, 图右上角的数字为该模态的方差贡献(图 4 同); d 和 e 中: 黑实线为 SOTA 第一模态, 黑虚线为 SOTA 第二模态, 灰粗实线为 SSTA 第一模态; SOTA: 次表层海温异常; SSTA: 海表面温度异常

3 ENSO 事件两个模态对亚洲—北太平洋—北美上空异常环流的影响及机制

将 700hPa 异常高度场、水平风场与 SOTA 作联合 EOF 分析, 前两个模态分别揭示了 El Niño 成熟期(图 2a)和衰退期(图 2b)相对应的亚洲—北太平洋—北美地区上空 700hPa 异常高度场(蓝色)及水平风场(矢量), 它们与 ENSO 两个模态同步变化, 捕捉了 ENSO 事件的主要信息。ENSO 成熟期主要出现在冬季, 过渡期主要出现在夏季, 因此图中分别绘出 1 月和 7 月 700hPa 平均高度场(桔红色)作为对比。由图可见, 在

El Niño 成熟期, 冬季在北太平洋东北部出现显著负变高和强气旋性异常环流, 阿留申低压显著加强, 在亚洲大陆出现显著正变高和反气旋性异常环流, 贝加尔湖高压脊显著加强, 蒙古高原为反气旋性异常环流; 北美西北部高压脊位置上出现正变高和异常反气旋环流。此时, 东亚大槽加深, 亚洲大陆贝加尔湖及北美高压脊加强, 中高纬大气环流经向度加大。同时, 在热带西太平洋—东印度洋海域为显著正变高和反气旋性异常环流。在 El Niño 衰退期, 夏季北太平洋副热带高压中心附近有显著正变高和反气旋性异常环流, 大值区向西南伸展; 北美地区中南部

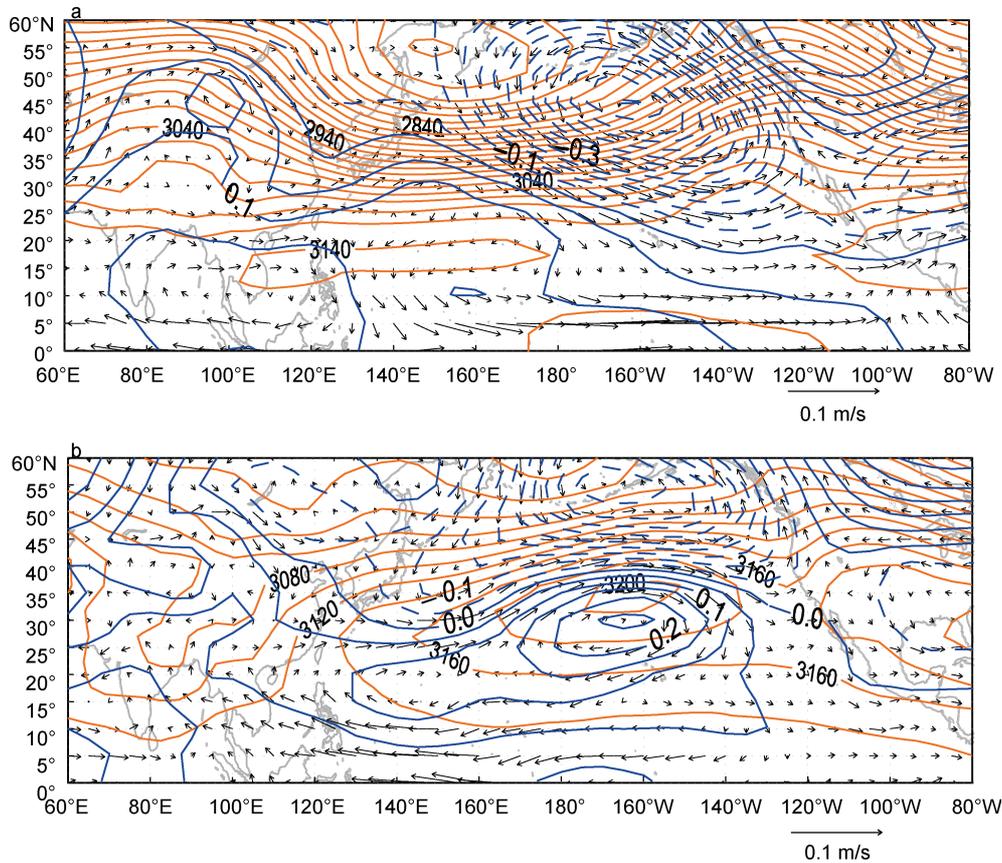


图2 基于联合 EOF 分析得到的 El Niño 成熟期(a)和衰退期(b)700hPa 异常高度场(蓝色等值线)和异常水平风场(矢量)
Fig.2 700hPa geopotential height anomaly field (blue contours) and anomalous horizontal wind velocity field (vectors) during El Niño mature phase (a) and El Niño decay phase(b) derived by joined EOF analysis

注: 蓝色等值线: 实线为正值, 虚线为负值, 等值线间隔为 0.05 位势米; 桔红色等值线为 1 月(a)和 7 月(b)平均 700hPa 高度场, 等值线间隔为 20 位势米; 右下角矢量图例表示 0.1m/s

为气旋性异常环流控制。同时, 在中高纬地区仍保持显著经向性环流特征, 乌拉尔山高压脊加强, 蒙古高原—新疆地区为正变高和反气旋性异常环流, 北太平洋中部槽加深, 北美地区高压脊加强。Chen 等(2012, 2013)基于 ENSO 事件的两个模态, 研究了对中国气候的影响, 得到了与观测基本一致的结果。

图3为 El Niño 成熟期(左)和衰退期(右)相联系的热带太平洋 RSSTA 和异常 Walker 环流和 Hadley 环流, 它们的时间系数同图 1d。这里同样采取了联合 EOF 分析方法, RSSTA 为 ENSO 事件相联系的海面温度; 垂直环流场中, 正值表征上升气流, 负值表征下沉气流。El Niño 成熟期, RSSTA(图 3a1)第一模态的空间分布与 SSTA 第一模态(图 1c)非常相似, 均以热带中东太平洋显著正海温异常舌状沿赤道西伸为特征, 二者时间系数相关达 0.97。此时, 赤道中东太平洋上空有强烈的异常上升运动, 赤道西太平洋—东印度洋和南美亚马逊河流域上空有显著异常下沉运

动, 表现为两个负异常 Walker 环流(图 3b1); 北太平洋中部(140°E—140°W)存在异常正的 Hadley 环流(图 3d1), 10°S—10°N 范围内上空异常上升, 10°—40°N(平均 25°N)上空异常下沉; 北太平洋西部(100°—140°E)存在弱的异常反 Hadley 环流(图 3c1), 20°S—20°N 上空异常下沉, 30°N 上空有很弱的异常上升。

El Niño 衰退期, RSSTA(图 3a2)空间分布表现为热带太平洋中部大范围显著的负异常海温, 大值区出现在赤道中太平洋, 其东西两侧为正异常海温; 赤道中太平洋上空为异常下沉气流, 其两侧的赤道西太平洋—东印度洋和赤道东太平洋—南美亚马逊河流域上空为异常上升气流, 表现为两个正异常 Walker 环流(图 3b2); 北太平洋中部的热带和副热带地区为异常下沉运动, 40°N 以北的中高纬度地区为较弱的异常上升气流(图 3d2), 北太平洋西部(100°—140°E)35°N 以南的热带—副热带地区为异常上升运动, 40°—50°N 的中高纬度地区为很弱下沉气流(图 3c2)。

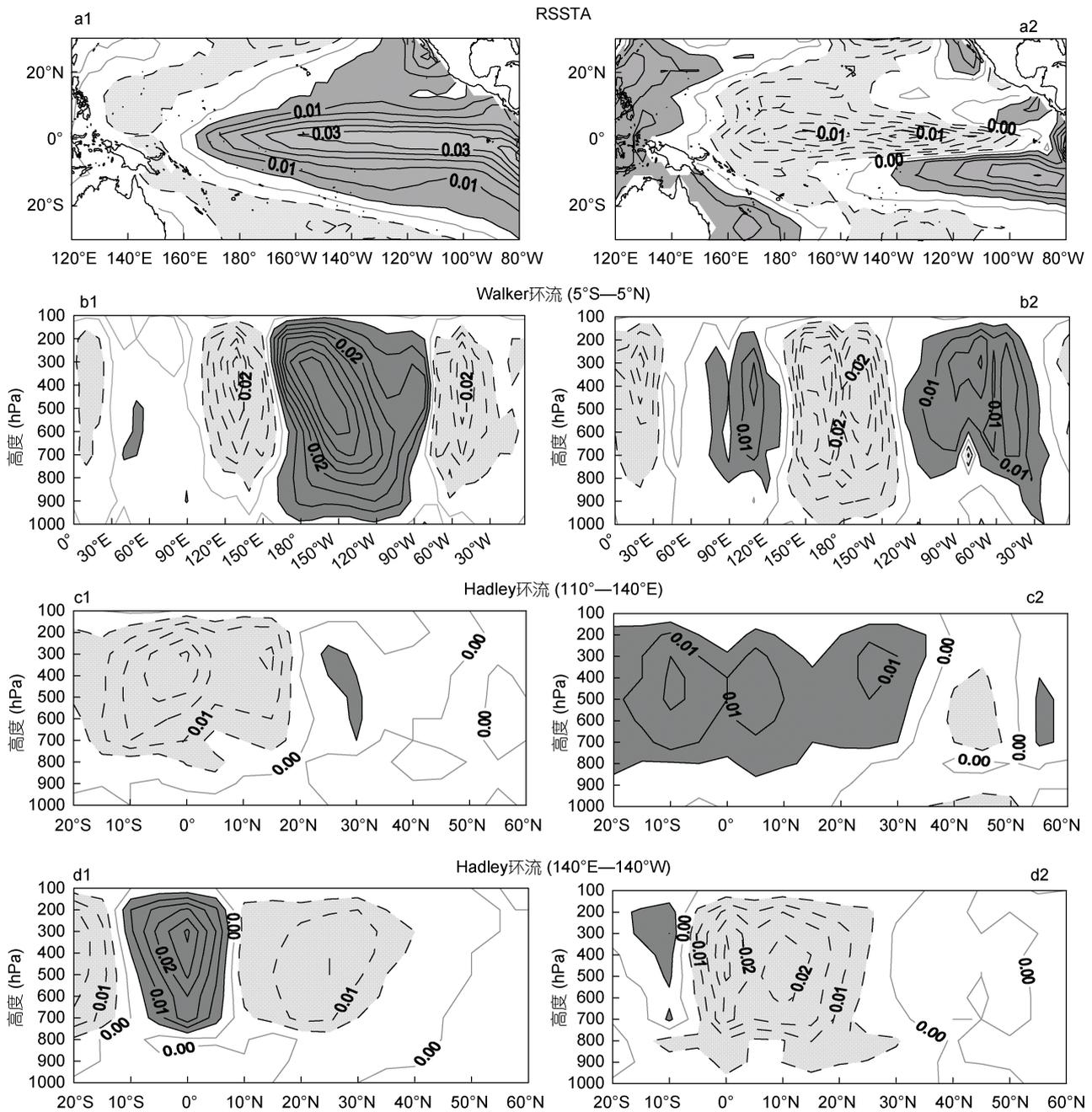


图3 El Niño 成熟期(左)和 El Niño 衰退期(右)相联系的热带太平洋海面温度异常(RSSTA, a)和垂直气流场(b—d)

Fig.3 ENSO-related sea surface temperature anomaly (RSSTA) in El Niño mature phase (a1) and El Niño decay phase(a2), b—d are the same as panel a, but for vertical air flow fields

注: b: Walker 环流(5°S—5°N); c: 北太平洋西部(100°—140°E) Hadley 环流; d: 北太平洋中部(140°E—140°W) Hadley 环流; 等值线间隔: a1 为 0.005°C, a2 为 0.002°C, b—d 为 $0.005 \times 10^{-3} \text{hPa/s}$; RSSTA: 与 ENSO 相联系的热带太平洋海面温度异常

Alexander 等(2002)研究指出, 在 ENSO 事件期间, 受热带太平洋海洋异常热力作用, 赤道上空 Walker 环流异常, 直接影响热带地区大气环流变化, 同时导致北太平洋 Hadley 环流异常, 并激发北向 Rossby 波, 如 PNA 波列, 将热带海洋异常能量通过“大气桥”传送到中高纬度, 造成中高纬海域上空大

气环流异常。对照图 2 和图 3, 可以清楚了解 ENSO 事件两个模态对大气环流影响的物理过程。在 El Niño 成熟期, 热带中东太平洋为正 RSSTA, 热带西太平洋—东印度洋为负 RSSTA, 海洋异常加热导致热带中东太平洋上空出现异常上升气流, 热带西太平洋—东印度洋异常下沉气流, 赤道太平洋 Walker

环流减弱,北太平洋中部经向正 Hadley 环流加强。此时,赤道海洋异常能量通过正异常 Hadley 环流和 Rossby 波传送到中高纬度,加大该地区环流经向度,致使东亚大槽加深,贝加尔湖和北美高压脊加强。同时,在热带西太平洋—东印度洋为负 RSSTA 和异常下沉气流,导致该区冬季副热带高压加强。在 El Niño 衰退期,热带中太平洋为负 RSSTA,有异常下沉气流,热带西太平洋—东印度洋为正 RSSTA,有异常上升气流,导致赤道太平洋正异常 Walker 环流。此时,北太平洋中部热带—副热带地区异常下沉气流,北太平洋副热带高压中心附近显著正变高,并有反气旋性异常环流伴随;北太平洋西部热带—副热带地区有正 RSSTA,异常上升气流导致西太平洋副热带高压减弱、位置偏南。二者共同作用,夏季热带—副热带地区反气旋性异常环流由北太平洋中部向西南伸展。同时,在北太平洋东部—南美热带—副热带地区为正 RSSTA 和异常上升气流,有利于北美地区中南部气旋性异常环流发展。由于中高纬地区冬季 El Niño 成熟期显著经向性环流的持续,夏季乌拉尔山和北美高压脊偏强。La Niña 成熟期和衰退期的情况相反。

由此可见,ENSO 事件确实存在两个模态,它们对大气环流有重要影响,影响的物理过程清晰。ENSO 通过与之相联系的 RSSTA 改变热带太平洋海面热力结构,进而强迫 Walker 环流和 Hadley 环流异常,导致热带太平洋和亚洲—北太平洋—北美地区上空大气环流变化及相关地区气候异常。

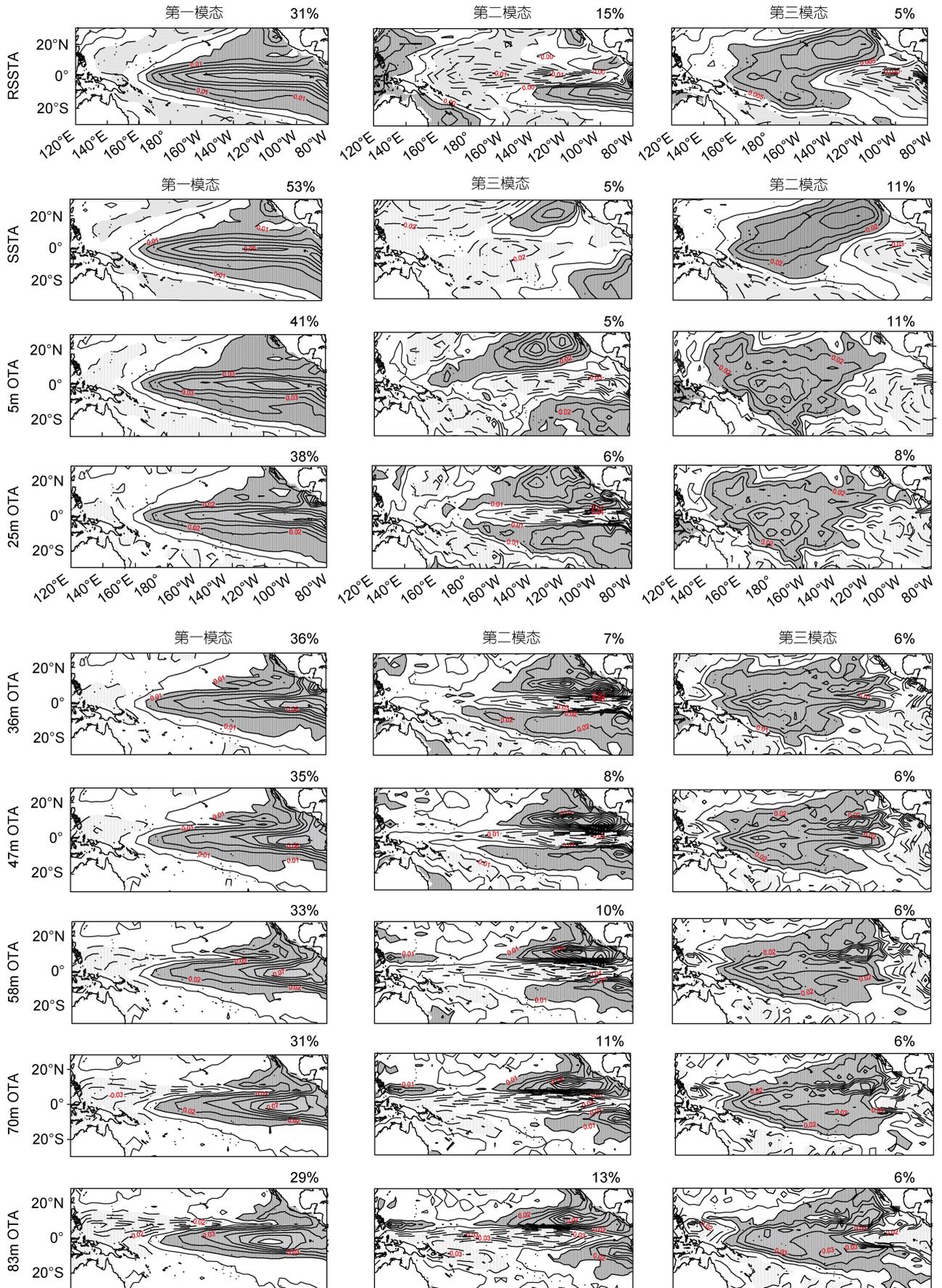
4 ENSO 事件期间热带太平洋次表层海洋对大气热输送特定边界过程

这里,我们分析了基于次表层海温异常的 ENSO 事件两个模态分别对应的大气环流异常,表明 SOTA 有可能是通过 RSSTA 直接传输异常热通量进入大气,进而影响大气环流。但传统观点认为,海气之间热通量输送是通过 SSTA 来完成的,次表层海洋并不直接接触大气,它无法直接影响大气环流。如果确实是 RSSTA 的作用,那么 RSSTA 与 SOTA 有何关系? RSSTA 与 SSTA 之间的区别及相互作用又如何?

ENSO 是发生在热带海洋次表层的重大海洋事件,海面温度随温跃层深度变化不断更新,温跃层上抬时,冷水上翻,次表层海温和海面温度下降;温跃层下降时,暖水下沉,次表层海温和海面温度增高。此时与 ENSO 事件相联系的 RSSTA 代表了这种未受

同期大气过程影响的海面温度变化,它随 ENSO 事件演变而不断变化,持续向大气输送热通量。对照图 3 中热带海洋 RSSTA 位置与同期的异常 Walker 环流和 Hadley 环流,正 RSSTA 区上空对应上升气流,负 RSSTA 区对应下沉气流。显然,正是这种 RSSTA 分布导致了热带海域上空 Walker 环流和 Hadley 环流的变化。

长期以来,人们总是认为 SSTA 是海洋对大气热输送的基本热力学参数,但实际上 SSTA 除受 RSSTA 的直接影响外,还受大气环流异常导致的异常风速、气温、云量和降水及上层海洋温度垂直结构等共同影响,后者是 RSSTA 导致热带太平洋大尺度海气相互作用的结果。这些影响中,随季节变化的温度层结决定了上层海洋的垂直混合;局地海气负反馈过程决定了大气环流异常与 SST 的相互作用——SST 升高,其上空对流加强,云量和降水增加,反过来导致 SST 下降。因此 SSTA 和 RSSTA 是很不一致的。RSSTA 可看作是仅受海洋热动力过程影响的 SSTA,而 SSTA 包含了 RSSTA 和大气异常导致的海温变化(sea temperature anomaly caused by atmospheric anomaly, 本文简称 STA)等两种信息。为了解 SSTA 和 RSSTA 与 SOTA 的关系,我们计算了上层海洋各层海温异常主要分布型,同时给出 SSTA、RSSTA 和 SOTA 相应分量作为对比(图 4)。由图可见,30m 以下各层海温异常(ocean temperature anomaly, OTA)及 SOTA 相联系的 RSSTA 的空间分布与 SOTA 前三个分量特征向量场由下至上呈逐步演变相似,时间变率基本一致(各层 OTA 前三个模态与 SOTA/RSSTA 相应模态的相关系数分别为 0.97—0.98、0.72—0.94 和 0.67—0.86)。这表明 30m 以下各层海温异常受 SOTA 三个模态的重要影响。30m 以浅各层 OTA 第一模态、SSTA 第一模态的时空分布与 30m 以下各层类似,与 SOTA 第一模态相关为 0.96;30m 以浅 OTA 第二模态与 SSTA 第二模态表现为 ENSO Modoki (Ashok *et al*, 2007),它与 SOTA 第二模态无显著相关,但与 SOTA 第三模态有相似的空间分布和基本同步的时间变率(相关系数达 0.74);30m 以浅 OTA 第三模态与 SSTA 第三模态具 SOTA 第二模态某些相似空间分布特征,但时间变率完全不同,因此没有对应关系。各模态时间系数的均方差表明,SSTA 和 30m 以浅 OTA 三个模态及 SOTA 第一模态极值多出现在秋冬季;SOTA(包括 RSSTA)和 30m 以下 OTA 第二模态极值多出现在夏季;SOTA 第三模态及 80m 以下 OTA 极值



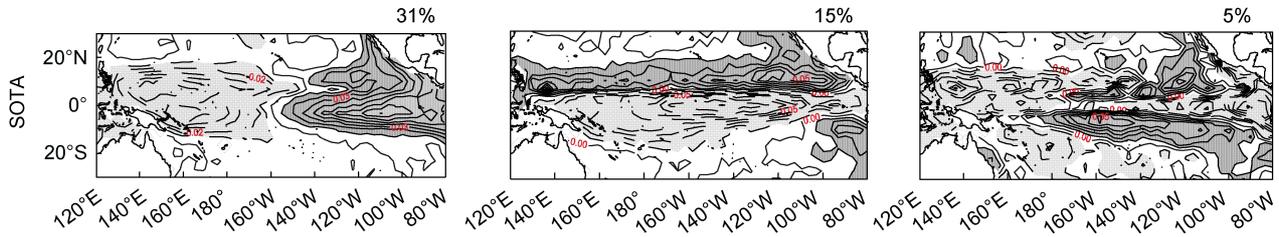


图4 SOTA 及相联系的 RSSTA 和热带太平洋各层海温异常(OTA)前三个特征向量场分布特征

Fig.4 The first 3 eigenvector fields of SOTA (lower panels), its associating RSSTA (upper panels), and ocean temperature anomaly (OTA) at different depths in tropical Pacific (middle panels)

注: 等值线间隔: RSSTA 第一、第三模态为 0.005°C , RSSTA 第二模态为 0.002°C , 其余均为 0.01°C

多出现在春季, 30—60m OTA 极值多出现在秋季, 60—80m OTA 极值的年变化很小。上述事实表明, 热带太平洋 RSSTA 和上层海洋 OTA 主要受 SOTA 三个模态控制, 它们是重大海洋事件演变过程中海洋内部热动力结构调整的结果; 大气环流异常对海温的作用仅发生在 30m 以浅的海洋浅表层, 其中春、夏季节 RSSTA 第二模态的影响被明显削弱。

由上述分析可知, 热带太平洋各层海温变化均受次表层海温制约, 与 ENSO 事件演变过程密切相关。但为什么春夏季节海洋浅表层海温变化与次表层变化不一致? 大气环流异常导致的 STA 如何影响 SSTA? 秋冬降温季节, 海洋浅表层为上冷下暖的不稳定温度层结, 风速较大, STA 对 SSTA 的影响通过上层海洋强烈垂直混合而迅速衰减, SSTA 更多受 SOTA 影响, SSTA 与 RSSTA 基本一致, 具有类似的 ENSO 成熟期模态。春夏升温季节, 海洋浅表层为上暖下冷的稳定温度层结; 在 ENSO 事件过渡期, RSST 显著增温(降温)海区上空上升气流加强(减弱), 云量增加(减小), 降水增多(减少), 海气之间呈显著负反馈过程, STA 为负值(正值)。在海洋浅表层稳定温度层结和局地海气负反馈共同作用下, STA 与 RSSTA 量级相当、符号相反, 导致 SSTA 丢失了 ENSO 信息, SSTA 无 ENSO 过渡期模态。

次表层海温异常实际上也反映了上层海洋热状态, SOTA 为负(正)时, 温跃层上抬(下降), 水温下降(上升), 上层海洋热含量减少(增大)。海洋对大气的影 响实际上表现为上层海洋热含量多寡对大气的热力作用, 这里 RSSTA 可以理解为上层海洋异常热含量导致的海面温度异常。黄荣辉等(2002)指出, 与 ENSO 循环有关的热带西太平洋热力状态及其上空对流活动, 对西太平洋副热带高压变化有重要影响; 陈永利等(2003)指出, 西太平洋暖池区热含量的年际变率对南海夏季风爆发有重要关系。本文的分析结果表明,

正是 ENSO 事件引起的上层海洋热含量变化通过 RSSTA 对大气的热通量输送, 造成了大气环流和相关地区的气候异常。

由此, 我们可以得到 ENSO 事件次表层两个模态对大气环流的影响过程及 SSTA 与 RSSTA 之间的关系。首先, ENSO 事件演变过程通过海洋内部热动力结构调整造成上层热含量变化和 RSSTA, 后者直接对大气进行热通量输送; 然后, RSSTA 对大气异常热输送引起大尺度海气相互作用, 导致大气环流异常; 最后, 大气环流异常伴随的云量、降水及风场变化通过海气负反馈过程反过来影响海洋表面温度变化, 产生与 RSSTA 反号的 STA, 抑制了 RSSTA。此时, SSTA 是 RSSTA 和 STA 共同作用的结果, 它更多地受高频大气过程的影响, 即海洋动力过程所致的表层海温变化被部分或甚至完全掩盖。上述过程随 ENSO 循环持续进行, 完成 ENSO 事件对大气环流的影响及对海洋的反馈。至此, 人们还是要问, 在 RSSTA 对大气热通量输送时, 同期的 SSTA 和大气热力状况会不会掩盖和影响 RSSTA? 这里需明确两个问题: 一、RSSTA 随 ENSO 事件演变不断更新, 与大气直接进行热通量输送的海面温度是瞬变的, RSSTA 是该瞬变海温异常的月平均值; 二、海洋热通量输送属海气小尺度相互作用过程, 这一过程在几分钟内即可完成, 它伴随 ENSO 事件全过程, 受 RSSTA 支配, 具 ENSO 变率。此时, 同期的 SSTA 受高频大气过程及太阳辐射制约, 但其导致的 SSTA 与 ENSO 事件周期无关。可以认为, 在 RSSTA 对大气热通量输送时, 同期的 SSTA 并不会掩盖和影响 ENSO 事件导致的 RSSTA 及其对大气直接热通量输送。

人们常用的 SSTA 包括了 RSSTA 和 STA 两部分, 这里 STA 为海气相互作用的结果。由于春夏季 RSSTA 受海气负反馈作用抑制, 春夏季 SSTA 缺失 RSSTA 信息, 但秋冬季 SSTA 与 RSSTA 时空分布基本一致, 因

此 SSTA 年际变率实际上主要由秋冬季 RSSTA 决定。这也就是为什么用 SSTA 资料研究 ENSO 事件仅能获得主要出现在秋冬季 ENSO 成熟期模态、而不能获取主要出现在夏季的 ENSO 过渡期模态的原因。显然, RSSTA 才是真正向大气热通量输送的海洋热力学界面, 用 SSTA 研究 ENSO 事件存在局限。以 SOTA 为主导场与 SSTA 为副场所作联合 EOF 分析的实质就是将受 ENSO 事件制约的 RSSTA 信息从 SSTA 中解析出来, 还原 ENSO 演变过程中次表层海温异常导致的海洋表面温度的变化。

基于 SSTA 预测 ENSO 存在“春季预报障碍”问题, 不管模式从何时开始预测, 大约在四、五月间总是出现预测技巧快速下降的现象。关于春季预报障碍的特征和产生的原因, 前人(Flügel *et al*, 1998)已经做了大量工作。尽管人们(Latif *et al*, 1998; Timmermann *et al*, 2018)采用不同的方法研究, 对其机制也提出了各种假设, 但产生预报障碍的原因仍无统一认识, 而且在 ENSO 的预测中, 该现象也未得到有效的改善。据本文分析结果可以清楚看到, 由于春夏季 SSTA 失去 ENSO 事件信息, 基于 SSTA 进行 ENSO 预测, 其结果必然出现严重预报障碍。ENSO 是源于海洋次表层的重大海洋事件, 用次表层海温异常资料研究和预测 ENSO 事件, 将会促进 ENSO 理论的进一步完善, 有助于提升 ENSO 事件预测能力。

5 结论

(1) 基于 SOTA 研究发现 ENSO 事件由两个模态主导, 二者构成 ENSO 循环。主要出现在冬季的第一模态对冬季及夏季亚洲—北太平洋—北美地区上空中高纬大气环流有重要影响, 主要出现在夏季的第二模态对夏季热带和副热带大气系统有重要作用。

(2) ENSO 事件通过 RSSTA 向大气输送热量, 引起 Walker 环流和 Hadley 环流变化, 导致热带地区和北太平洋及周边地区上空大气环流异常, 进而影响这些地区冬季和夏季的气候。

(3) SSTA 包含 RSSTA 和 STA 两部分, RSSTA 是 ENSO 事件过程中海洋内部热动力结构调整导致的海面温度变化, 在海洋对大气的热输送过程中, 它随 ENSO 的演变不断更新; STA 是 RSSTA 驱动大气导致的大气环流异常对海面温度的影响, 在海洋浅表层 STA 对 RSSTA 有重要影响。秋冬季节, SSTA 保留了 ENSO 信息; 春夏季节, 海洋浅表层稳定温度层结和局地海气之间的负反馈过程, 使 SSTA 丢

失了 ENSO 信息, 这也可能是产生 ENSO 事件春季预报障碍的原因。人们常用的 SSTA 变率实际上主要由秋冬季 RSSTA 主导, 用 SSTA 资料研究 ENSO 事件存在局限。

参 考 文 献

- 李崇银, 2002. 关于 ENSO 本质的进一步研究. 气候与环境研究, 7(2): 160—174
- 陈永利, 李琦, 赵永平等, 2010. 太平洋次表层海温异常年际变率的信号通道与 ENSO 循环. 海洋与湖沼, 41(5): 657—666
- 陈永利, 胡敦欣, 2003. 南海夏季风爆发与西太平洋暖池区热含量及对流异常. 海洋学报, 25(3): 20—31
- 黄荣辉, 陈文, 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展. 气候与环境研究, 7(2): 146—159
- 巢纪平, 袁绍宇, 巢清尘等, 2003. 热带西太平洋暖池次表层暖水的起源—对 1997/1998 年 ENSO 事件的分析. 大气科学, 27(2): 145—151
- Alexander M A, Bladé I, Newman M *et al*, 2002. The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. Journal of Climate, 15(16): 2205—2231
- Ashok K, Behera S K, Rao S A *et al*, 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. Journal of Geophysical Research: Oceans, 112(C11): C11007
- Chen Y L, Zhao Y P, Feng J Q *et al*, 2012. ENSO Cycle and Climate Anomaly in China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 30(6): 985—1000
- Chen Y L, Zhao Y P, Wang F *et al*, 2013. Decadal variability of subsurface ocean temperature anomaly in Tropical Pacific and its impact on climate of China. Journal of Tropical Meteorology, 19(3): 253—263
- Diaz H F, Markgraf V, 2000. El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale variability and Global and Regional Impacts. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 496
- Flügel M, Chang P, 1998. Does the predictability of ENSO depend on the seasonal cycle? Journal of the Atmospheric Sciences, 55(21): 3230—3243
- Huang R H, Chen W, Yang B L *et al*, 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle. Advances in Atmospheric Sciences, 21(3): 407—424
- Jin F F, 1997. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: conceptual model. Journal of the Atmospheric Sciences, 54(7): 811—829
- Latif M, Anderson D, Barnett T *et al*, 1998. A review of the predictability and prediction of ENSO. Journal of Geophysical Research: Oceans, 103(C7): 14375—14393
- Schopf P S, Suarez M J, 1988. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. Journal of Atmospheric Sciences, 45(3): 549—568
- Timmermann A, An S I, Kug J S *et al*, 2018. El Niño—Southern Oscillation complexity. Nature, 559(7715): 535—545
- Wang B, Wu R G, Fu X H, 2000. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate. Journal of Climate, 13(9): 1517—1536
- Zhao Y P, Chen Y L, Wang F *et al*, 2007. Mixed-layer water oscillations in tropical Pacific for ENSO cycle. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(12): 1892—1908

TWO MODES OF SUBSURFACE OCEAN TEMPERATURE ASSOCIATED WITH ENSO AND THEIR IMPACTS ON ATMOSPHERIC CIRCULATION

CHEN Yong-Li^{1, 2, 3}, TANG Xiao-Hui^{1, 2, 3}, WANG Fan^{1, 2, 3, 4}, ZHAO Yong-Ping^{1, 2}

(1. CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. College of Marine Science, University of Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract Based on SODA ocean assimilation data and NCEP reanalysis atmospheric data, we analyzed the relationship between the tropical Pacific subsurface ocean temperature anomaly (SOTA) and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) cycle, as well as the impact of SOTA on atmospheric circulation. By reviewing the traditional ENSO research, we pointed out the existing problems and proposed a new solution to study the influence of ENSO on atmospheric circulation. We found that (1) ENSO events have two modes as seen from the SOTA field. The first mode presents mainly in boreal winter, and affects the mid-latitude atmospheric circulation over the Asia-North Pacific-North America in winter and summer. The second mode appears in summer and has an important impact on atmospheric circulation over the tropical and subtropical system. (2) Via the ocean-to-atmosphere heat transport induced by the ENSO-related tropical Pacific sea surface temperature anomalies (RSSTA), the ENSO events influence the Walker circulation and Hadley cell, leading to variations of atmospheric circulation over the tropical and north Pacific, and hence the climate of the surrounding areas in winter and summer. (3) SSTA consists of RSSTA and sea temperature anomaly caused by atmospheric anomaly (STA). RSSTA is the sea surface temperature variations caused by internal thermodynamic adjustment in the ocean. It changes continuously with the evolution of ENSO events. STA is caused by the atmospheric forcing, which responds to the RSSTA. In the shallow surface layer, the STA has a significant influence on RSSTA. Finally, we discussed the heat transport processes in ocean-atmosphere boundary layer during ENSO events. We indicated that ENSO events give rise to the RSSTA by thermodynamic adjustment in the interior ocean, and the RSSTA directly heats the atmosphere, resulting in anomalous atmospheric circulation and the STA through local air-sea feedback process, which in turn holds back the RSSTA. Moreover, the SSTA variations are dominated actually by the RSSTA in fall-winter, while ENSO information in spring-summer is missing as seen from SSTA variations. There would be deficiency if studying ENSO by SSTA alone, which could also be one of the causes of spring barrier problem in ENSO predictability.

Key words two modes of the ENSO events; sea surface temperature anomaly (SSTA); subsurface ocean temperature anomaly (SOTA); anomalous atmospheric circulation; ocean-atmosphere heat transport