关于2015年厄尔尼诺事件的二次变暖过程: 一个基于中等复杂程度海洋模式的诊断分析

张荣华^{1,2,3*}, 高川^{1,3}

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. 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, 青岛 266237;

3. 中国科学院大学, 北京 100029

* E-mail: rzhang@qdio.ac.cn

收稿日期: 2016-10-24; 接受日期: 2016-12-19; 网络版发表日期: 2017-01-23

国家自然科学基金项目(批准号: 41690122、41690120、41490644、41490640和41475101)、中国科学院战略重点专项项目(编号: XDA11010105和XDA11020306)、青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山人才计划项目(编号: 2015ASTP)、国家自然科学基金委员会-山东联合资助海洋科学研究项目(编号: U1406401)、国家自然科学基金创新群体项目(批准号: 41421005)及山东泰山学者、山东省自主创新重大关键技术项目(编号: 2014GJJS0101)、青岛创新领军人才计划(编号: 13-CX-22)、中国博士后科学基金资助项目和青岛市博士后应用研究项目资助

摘要 自2014年起热带太平洋经历了持续的增暖现象,并在2015年发生了一次强厄尔尼诺(El Niño)事件. 这次事件的一个显著特征是: 2014~2015年间,赤道中东太平洋海区次表层温度正异常呈马蹄型形态并持续存在. 本文结合观测资料和中等复杂程度的海洋模式模拟,对2014~2015年间海表温度(SST)异常的演变进行分析,重点探讨2015年El Niño事件所涉及的海洋过程及其与SST异常演变间的关系,包括海洋边界处赤道波动(由海表高度(SL)信号表示)的传播和反射相关的遥影响作用、次表层正热力异常的局地效应等. 结果表明,2014~2015年持续性的次表层的热力正异常对赤道太平洋SST暖异常的维持起到了重要作用. 对SST的热收支分析揭示了在2014~2015年SST异常演变中起主导作用的过程. 这些分析加深了对2015年El Niño事件相关过程的理解及当前ENSO理论在多大程度上能解释这次事件的认知.

关键词 2015年El Niño事件, 中等复杂程度的海洋模式, 过程分析, SST收支

1 引言

观测和模拟表明,厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)现象具有多样性和多变性. 例如,在2014~2015年间,热带太平洋经历了持续的海表温度(SST)暖异常现象(McPhaden, 2015). 2014年年初, SST存在较弱的增暖, 2014年年中增暖暂停,而后于2015年年初迅速二次变

暖,形成2015年的强El Niño事件. 2015年El Niño事件的一个显著特征是: 2014~2015年间热带中西太平洋一直维持SST暖异常状态. 尤其是,相关的海气异常在2015年春季至夏季发生强烈耦合,于2015年春末加强并迅速发展成强的暖事件,并于2015年年末达到成熟阶段. 值得一提的是,相似的海气过程于2014年年初也出现在热带西太平洋,但是SST暖异常于2014年年

中文引用格式: 张荣华, 高川. 2017. 关于2015年厄尔尼诺事件的二次变暖过程: 一个基于中等复杂程度海洋模式的诊断分析. 中国科学: 地球科学, 47: 1027~1039, doi: [10.1360/N072016-0201](https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072016-0201)
英文引用格式: Zhang R H, Gao C. 2017. Processes involved in the second-year warming of the 2015 El Niño event as derived from an intermediate ocean model. Science China Earth Sciences, 60: 1601~1613, doi: [10.1007/s11430-016-0201-9](https://engine.scichina.com/doi/10.1007/s11430-016-0201-9)

中减弱, 未能在2014年年末发展成一个强El Niño事件(2014年仅形成弱的暖异常态; Hu和Fedorov, 2016). 同样值得注意的是, 上次El Niño事件发生于2009年, 离此次的2015年El Niño事件有近5~6年的时间, 表明这两次El Niño事件相隔了较长时间.

从实时预报角度来看, 一些耦合模式将2014年预报成强El Niño事件年, 这一预报失误令学术界很尴尬. 同时, 耦合模式自2015年春季对2015年El Niño事件的爆发的预报存在很大的不确定性(Zhang和Gao, 2016b). 此外, 不同耦合模式自2015年初对于夏季至秋季的2015年El Niño事件的强度的预报差异很大. 这些差异表明, El Niño事件的实时预报存在很大的挑战.

2015年El Niño事件的演变非常复杂, 可能与年代际变化和全球变暖相关联(McPhaden, 2015). 因此, 这次事件受到众多的关注. 目前对2015年El Niño事件的理解仍然很有限(Hu和Fedorov, 2016; Liu等, 2015; Min等, 2015; Zhang和Li, 2015; Zhu等, 2016; Levine和McPhaden, 2016), 包括2014~2015年SST暖异常持续存在的根本原因、SST增暖在2015年3月爆发(而不是像大多数其他事件在6月爆发)、以及2015年春末至夏季海气异常的迅速耦合强化等. 因此, 对相关过程的理解和提高耦合模式的实时预报是至关重要的研究课题.

之前, 我们已经发展了一个以中国科学院海洋研究所(IOCAS)命名的中等复杂程度海气耦合模式(ICM), 即IOCAS ICM(Zhang和Gao, 2016b). IOCAS ICM的特点之一是次表层上卷到混合层海水温度(T_e)的参数化方式: ICM中次表层温度异常对SST的影响由 T_e 和海表高度(SL, 表征温跃层的变化)间的关系来表征. 目前, IOCAS ICM定期为国际学术界提供热带太平洋SST演变的实时预报结果(详见美国哥伦比亚大学国际气候研究所(IRI)有关ENSO模式预报集成分析的网站(<http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/update.html>)). 当用所得到的表层风场资料强迫IOCAS ICM中的海洋模式时发现, 该模式可以准确地模拟出2014~2015年赤道太平洋SST的演变. 本文利用单独的海洋模式(ocean-only)模拟2015年El Niño事件的演变, 具体阐明如下问题: 2014~2015年间赤道中太平洋SST暖异常是如何维持的? 海洋波动(由SL信号表征)在西边界和/或东边界的反射起到什么作用? 次表层热力异常(由 T_e 场表征)在维持2014~2015年间SST暖异常的作用是什么? SST暖异常

于2014年年中减弱以致于2014年年末未形成强El Niño事件所涉及的过程是什么? 2015年El Niño事件的发展与ENSO的延迟振子理论(delayed oscillator)所表征的过程一致吗?

2 观测资料和中等复杂程度的海洋模式

本文采用不同的观测和再分析数据对热带太平洋异常状态的演变进行描述, 并对模式模拟进行验证. 观测的SST资料来自Reynolds和Smith(1994); 风应力数据为美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)联合推出的再分析资料; 海洋温度和盐度资料为国际太平洋研究中心(IPRC)和东亚-太平洋资料研究中心(APDRC)的Argo格点产品(Kalnay等, 1996), 包括月平均和气候态平均场; 月平均的混合层深度(MLD)和 T_e 资料同样由IPRC/APDRC的Argo产品得到; 格点的SL异常资料来自Aviso的Ssalto/Duacs卫星高度计产品, 可由网上直接获取(<http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/>). 此外, 热带太平洋海气异常的实时演变可以直接在热带大气海洋计划(TAO)实时数据观测网站上在线获得(<http://www.pmel.noaa.gov/tao/>).

采用ICM的海洋模块来模拟热带太平洋SST的演变(Zhang等, 2003, 2005; Zhang和Gao, 2016a). 动力海洋模式是由Keenlyside和Kleeman(2002)基于垂直方向斜压模分解方法(McCreary, 1981)而发展的一个中等复杂程度的海洋模式. 与Zebiak-Cane模式(Zebiak和Cane, 1987)不同, 这一相对较新的ICM考虑了海洋层结的水平变化和上层海洋的实际垂向热力结构(如包含了10个垂直模态). 此外, ICM还部分地考虑了动量方程的非线性项, 从而可以更为真实地模拟出赤道海洋的纬向流场.

ICM的另一个关键部分是次表层上卷到表层混合层海水温度(T_e)的参数化过程, T_e 场的变化直接由温跃层的变化(用SL变化表示)来表征: 利用由SST距平方方程反算得到的 T_e 场及其与SL变化间的关系来优化 T_e 场(Zhang等, 2005), 该模式已成功用于ENSO模拟和预报. 在根据ENSO模拟和历史回报等对模式性能进行优化后(Zhang和Gao, 2016a), 这一模式已以中国科学院海洋研究所(IOCAS)冠名(称之为IOCAS ICM). 自从2015年8月起, IOCAS ICM每月提供热带太平洋SST

演变的实时预报结果(Zhang和Gao, 2016b). 更多信息请参见IRI ENSO实时预报网站.

大气风应力异常模块是一个采用奇异值分解(SVD)方法构建的经验统计模型(Zhang等, 2003), 由重构的风应力异常驱动单独的海洋模块可以真实地模拟出SST年际变化的空间结构和时间演变. 下面我们将基于这一强迫的海洋模式模拟来分析2015年El Niño事件所涉及的过程.

3 2014~2015年间异常演变的特征

图1给出了观测的SST和NCEP/NCAR再分析产品得到的纬向风应力的年际异常演变. 赤道太平洋在

2014~2015年间呈现持续的暖异常态, 海表温度在2014年年中出现一个下降, 随后于2015年5月迅速增暖(图1a); 并在赤道中西太平洋伴有西风异常(图1b). 对于次表层海洋而言, 次表层温度正异常在2014~2015年间维持在赤道中西太平洋. 起源于西边界区域的SL异常信号沿赤道向东传播, 对赤道中东太平洋SST起到增暖或变冷的作用. 例如, 2013年年末观测到西太平洋地区的SL正异常沿赤道向东传播, 于2014年春季到达东部并对那里的SST产生增暖影响, 2014年年初, 一个较弱的SL负异常信号沿赤道向东传播至赤道东太平洋, 于2014年年中到达东部并对那里的SST产生变冷影响, 这一过程导致2014年夏季SST暖异常的减弱.

图1 观测的SST(a)和NCEP/NCAR(b)再分析产品所得纬向风应力的年际异常沿赤道的纬圈-时间分布
SST的等值线间隔为 0.5°C , 纬向风应力的等值线间隔为 0.1dyn cm^{-2}

2015年春季, 赤道中太平洋SL异常变强, 但此时未观测到有来自西太平洋的传播信号; 相反, 2014年年末在赤道东太平洋形成SL正异常信号, 由东边界反射并在赤道外海区向西传播, 这一异常信号于2015年年初并入赤道区域, 使得赤道中太平洋地区的次表层热力异常加强. 这些过程导致赤道中东太平洋较大的SST暖异常的产生, 并在西侧伴有西风异常. 于是, SST和风异常间耦合, 导致SST暖异常于2015年夏季快速增大, 发展成一个强El Niño事件, 并于2015年年末达到顶峰. 这些特征在TAO提供的观测资料网站上清晰可见, 并可用于验证模式模拟.

图2和3给出了SST、纬向风应力、SL和 T_e 的年际异常沿赤道的纬圈-时间分布. 其中, 风应力异常是根据经验的风应力异常模块由观测的SST异常构建所得(Zhang等, 2003), T_e 异常是根据经验的 T_e 异常模块由模拟的SL异常计算所得(Zhang等, 2005).

与观测相比(图1), IOCAS ICM的海洋部分可以准确地描述这些场的年际变化. 例如, 模式非常好地刻画了2009~2015年间SST的演变(图2a): 2009年年末发生了一次较弱的El Niño事件, 随后2010年发生La Niña事件, 并在2011年产生二次变冷事件(Zhang等, 2013); 自2013年年末起, SST增暖现象出现于东部海盆, SST暖

图2 SST(a)和纬向风应力(b)异常沿赤道的纬圈-时间分布

纬向风应力异常是根据经验的风应力异常模块由观测的SST异常构建所得. SST的等值线间隔为 0.5°C , 纬向风应力的等值线间隔为 0.1dyn cm^{-2}

图3 SL(a)和 T_e (b)异常沿赤道的纬圈-时间分布

T_e 异常是根据经验的 T_e 异常模块由模拟的SL异常计算所得. SL的等值线间隔为3cm, T_e 的等值线间隔为0.5°C

异常于2014年年初出现,但是在2014年夏季减弱;随后,暖异常态于2014年年末到2015年年初加强;2015年年中,SST暖异常通过海气耦合快速增大,导致2015年强El Niño事件发生.值得一提的是,2009年和2015年的两次El Niño事件之间存在一个很长的时间间隔,大约5~6年.

为了更加详细地说明异常场的时空演变特征,图4和5给出了海洋模式于2015年年初模拟所得的一些相关异常场的水平分布.与图2和3一起,可更为清晰地表明赤道和赤道外区域SST、表层风场、SL和 T_e 场的空间结构和位相关系.模式模拟所得的这些异常场

间的关联可用于阐明2015年El Niño事件所涉及的相关过程.详细的分析结果如下.

3.1 SST暖异常的持续性

2014~2015年间赤道中西太平洋海洋-大气异常的一个显著特征是,SST暖异常的持续盛行(图2a).例如,SST暖异常自2014年年初起持续停留在赤道中太平洋,并伴随有赤道西太平洋的持续西风异常(图2b);2014年年中SST暖异常减弱,并伴有西风异常的减弱;2015年春末,赤道东太平洋SST暖异常加强,于2015年年中快速增大,并伴有西风异常(图4).

图4 SST和风应力异常的水平分布
SST的等值线间隔为 0.5°C , 风应力为矢量, 单位: dyn cm^{-2}

这里一个关键的问题在于, SST暖异常是如何持续维持在赤道中西太平洋的. 不同的过程对SST异常演变在起作用, 包括: 与海洋波动的传播及其在东、西边界反射等相关的遥影响, 与次表层的热力正异常和风场强迫相关的局地效应等. 这些过程共同作用, 决定了2014~2015年间SST的演变. 对这些过程间的关系及其对SST的影响方式进行如下分析.

3.2 由SL信号表征的热带海洋波动的传播及其在边界反射相关的遥影响

海洋中, 温跃层的年际变化表现出显著的赤道波动的传播特性, 对整个海盆的热力状态产生遥影响, 从而为热带太平洋气候系统提供了低频记忆. 例如, SL信号趋于沿赤道向东传播, 在赤道外海区向西传播, 并在东、西边界发生反射(McCreary, 1981; Zebiak和Cane, 1987; Jin和An, 1999; Gao和Zhang, 2017). 赤道太平洋SST变化与赤道和赤道外地区传播的SL信号及其在东、西边界的反射存在显著的关联, 在2014~2015

年间存在一些明显的例子, 可阐述如下.

例如, 2013年的La Niña事件期间, 由于中部海盆存在比正常偏强的信风使得西太平洋暖水堆积, 西部海盆的SL逐渐升高. 2013年年末, SL正异常信号自西边界沿赤道向东传播(图3a), 于2014年年初到达赤道东太平洋并对那里的SST产生增暖的效应; 实际上, SST暖异常在赤道东太平洋出现(图2a), 并在西侧伴有西风异常(图2b). 2014年年初, SL负异常信号起源于西边界区域并沿赤道向东传播(图3a), 这一信号于2014年年中到达赤道东太平洋, 对那里的SST产生变冷的影响; 确实, 2014年夏季, 太平洋东部的SST暖异常减弱(图2a). 这一结果可以解释为什么2014年夏季SST和风异常未能强耦合发展. 这里值得注意的是, 来自西太平洋的SL负异常对赤道东太平洋的SST产生变冷影响, 但其强度不足以逆转赤道中东太平洋SST暖异常态, 从而2014年赤道太平洋仍维持暖异常.

2015年年初, 赤道中太平洋SST和SL异常加强, 然而, 此时并未能追踪到有来自西边界区域的SL传播信

图5 海洋模式模拟所得SL(左)和 T_e (右)异常的水平分布

SL的等值线间隔为3cm, T_e 的等值线间隔为0.5℃

号(图3a)。因此,起源于西太平洋的海洋过程(如SL信号在西边界反射)并未对赤道中太平洋SST暖异常的增强起到主要作用。为了解释这一现象,必须对赤道东太平洋的过程进行分析。例如,2014年年末赤道东太平洋出现SL正异常,经东边界反射并在赤道外海区向西传播(图5a);进一步,这些SL正异常信号于2015

年年初并入赤道中太平洋海区(图5b和c),与早先持续存在的SL正异常结合;这一过程加强了 T_e 正异常(图5g-h),从而对2015年春季的SST产生较大的增暖作用。因此,2014年年末至2015年年初,SL正异常经东边界反射并沿赤道外北太平洋海区向西传播,对2015年年初SST增暖的加强起到重要的作用。

3.3 次表层热力异常持续性及其对SST的局地影响

除了传播的SL信号引发的遥影响外, SST变化还与赤道中东太平洋次表层的热力异常的局地效应有关。在2014~2015年间, 赤道中太平洋持续存在较大的 T_e 正异常, 所呈马蹄型的分布联结了赤道和赤道外次表层异常的变化(图5f-j)。这一 T_e 正异常对维持SST暖异常的重要性可由以下两个例子说明。一个例子是在维持2014年年中赤道东太平洋的SST暖异常态中所起的作用。如上所述, 尽管SL负异常信号于2014年年初沿赤道向东传播, 并于2014年4~6月到达东部并对SST产生变冷的影响, 但是SST暖异常态仍然盛行在赤道东太平洋。事实上, 东部的SST暖异常确实减弱了(图2a); 然而, 由西太平洋传播来的SL所起的变冷效应不足以完全反转东部暖异常态, SST暖异常态于2014年年末仍维持在热带太平洋。这样, 赤道中太平洋持续的 T_e 正异常对SST具有强烈的增暖作用, 使得2014年年中至年末的SST暖异常态得以维持。

另一个例子与2015年年初赤道中太平洋SST暖异常发展相关。此时, 未有直接来自于西边界区域的SL传播信号, 因此, 西太平洋的海洋过程(如SL信号在西边界反射)对东部海盆SST暖异常的加强未起到主要作用。相反, 较大的 T_e 正异常信号在赤道中西太平洋持续存在并增强(图5f-j), 对SST暖异常态的维持起到了重要作用(图4)。尤其是, 赤道中太平洋区域的 T_e 正异常态通过赤道东太平洋的过程而加强, 如2015年年初, 赤道东太平洋地区的SL正异常经东边界反射, 并在赤道外海区向西传播并并入赤道区域, 从而加强了中部海盆 T_e 正异常并对SST增暖起增大的作用。所引发的SST暖异常伴随有西风异常, 导致二者进一步耦合加强。因此, 2014~2015年间持续的 T_e 正异常型对赤道中东太平洋区域SST暖异常的维持和加强起到重要作用。

3.4 SST收支分析

为了确定哪些物理过程对SST年际变化起主导作用, 我们对混合层温度变化的热量收支进行了分析。决定SST变化的局地变率(倾向)的主要过程包括: 水平平流项、垂直平流项、水平扩散项、垂直扩散项以及海表热通量。注意, 热通量总是对年际时间尺度上SST异常起到减弱作用(Zhang和Gao, 2016a), 接下来

的讨论不再显示。图6和7给出模拟所得的2015年年初SST主要的收支项(纬向、经向、垂直平流项、垂直扩散项及其四项总和)的空间分布。不同项对热收支的贡献在空间和时间上变化很大, 对SST变化产生影响的各个过程的相对重要性可清晰表明。

如前文所述, 一个显著特征是赤道中太平洋的SST暖异常持续存在, 2015年5~6月首次出现显著变暖现象(图2a)。因此, 一个关键问题是, 这一SST暖异常态是如何维持的。SST收支分析表明, 2015年年初在日界线附近出现SST正异常的趋势(图6), 这主要是由于与 T_e 正异常(图5f-j)相关的垂直扩散项的作用(图6a4和6b4)。因此, 很明显, 通过垂直扩散过程, T_e 正异常引发并维持了日界线附件SST的暖异常(图4); 此外, 赤道西太平洋西风异常直接强迫海洋洋流异常, 通过水平平流作用也引发SST的增暖(图6a1-a2和图6b1-b2)。

随着时间演变, 垂直扩散项的正值区和相关的SST增暖更加向东移动, 自2015年5月起, 较大的SST暖异常出现在赤道东太平洋区域(图7)。例如, 在2015年年中El Niño发展阶段, 赤道中东部海盆的热收支主要受垂直平流项和扩散项的主导作用; 在西太平洋, 赤道外日界线附件出现SST的变冷倾向, 主要是由于与 T_e 负异常(图5f-j)相关的垂直扩散项的主导作用(图7a4和7b4)。

因此, 在强 T_e 异常信号的影响下, 赤道太平洋通过垂直扩散作用产生并维持SST暖异常, 特别是在2015年年初至年中, 赤道区域 T_e 正异常使SST持续增暖。在赤道上, 温跃层的正反馈(与平均上翻和垂直扩散引起的 T_e 异常的垂向平流相关)对SST异常的快速发展起到重要作用。这些结果表明, T_e 对控制热带太平洋SST变化起到主要作用, 通过上卷过程可以对赤道中东太平洋地区SST产生直接的影响。本文所得结果与先前的分析和模式研究相一致(Zhang和Gao, 2016a), 次表层热力异常过程对热带太平洋SST的维持和发展起到重要的作用。

基于上述分析, 图8给出了影响2015年SST演变的几个过程的示意图。2015年El Niño事件作为一系列开始于2014年的SST暖异常的持续而出现, 于2015年年中至年末发展成强烈的二次变暖现象, 并可进一步追踪回更早一年。在2013年, 热带中东太平洋盛行较弱的SST冷异常态, 其西侧伴有东风异常, 对海洋造成了直接的影响, 随后引发的几个过程对2015年二次变暖

图6 模式模拟所得2015年1月(左)和2015年3月(右)纬向平流项、经向平流项、垂直平流项、垂向扩散项及其四项总和的热收支的水平分布
等值线间隔为0.5°C/月

起到重要作用. 与次表层异常相关(由SL表征), 整个海盆存在明显的SL传播信号, 对 T_e 和SST产生遥影响. 例如, 赤道外海区, 东部海盆存在2014年暖异常态产生的较大的SL正异常, 并在赤道外北太平洋海区向西传播, 这一赤道外SL正异常于2015年春季并入日界线附近的赤道区域, 与此处的SL正异常合并(图5a~e), 加强并维持了 T_e 正异常态(图5f~j). 赤道中东太平洋区域加强的 T_e 正异常对SST起到强烈的增暖作用, 造成较大

的SST暖异常, 并在西侧伴有西风异常; 2015年春季, SST和表层风场相关的异常场通过耦合进一步加强, SST暖异常于2015年5月在东部海盆系统性地出现加强; 至2015年春末, 海洋表层出现El Niño事件发展的显著信号.

4 总结与讨论

热带太平洋在2014~2015年间一直维持了SST暖

图7 模式模拟所得的2015年5月(左)和2015年7月(右)纬向平流项、经向平流项、垂直平流项、垂向扩散项及其四项总和的热收支的水平分布
等值线间隔为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{月}$

异常态,并于2015年发展成一次强的El Niño事件,这成为学术界乃至公众和媒体的热门话题。目前对相关SST演变的认知仍然十分有限,有必要详细分析理解2015年El Niño事件所涉及的过程。目前,我们已改进了IOCAS ICM的性能,并定期为ENSO提供实时预报结果。与观测相比,IOCAS ICM的海洋模式在风应力

驱动下可以成功地描述赤道太平洋SST的时空演变。本文基于单独的海洋模式模拟结果来阐明海洋-大气异常场间的关系,解释与2015年El Niño事件演变相关的重要过程,认清当前ENSO理论对这次事件演变所能解释的程度和不足。

如温跃层反馈(Bjerknes feedback)所示(Bjerknes,

图8 影响2015年SST异常态的主要过程的示意图

较大的 T_e 正异常在2014~2015年间维持在赤道中西太平洋,其马蹄型分布连接了赤道和赤道外次表层热力异常,存在几个过程维持了 T_e 的形态:对大气而言,西风异常于2015年出现在日界线以西海区,这一异常使温跃层加深,在中部海盆产生 T_e 正异常;对于海洋而言,赤道外地区次表层正的热力异常与赤道中太平洋相连,在赤道上维持了 T_e 正异常;此外,在2014年暖异常态期间,自东边界海区的SL正异常信号在赤道外海区向西传播,这些异常信号并入赤道中太平洋,加强了赤道中太平洋 T_e 的正异常

1969),大尺度的温跃层扰动(可由SL信号清楚地表征)与表层风场和SST间的耦合对ENSO循环非常重要。例如,一个重要的过程是热带太平洋上层海洋热容量(由SL表征)的大尺度结构:SL信号在整个海盆的系统性传播性为海气系统的年际变化提供了低频记忆。事实上,赤道海洋波动过程(可由SL信号表征)可跨海盆传播而得以追踪。SL信号的传播及其在西边界和/或东边界反射对赤道太平洋SST产生遥影响,在ENSO循环过程中提供正/负反馈作用。此外,次表层热力异常对赤道中东太平洋SST产生局地影响,尤其是,较大的次表层正的热力异常于2014~2015年间在赤道中太平洋持续存在, T_e 的马蹄形分布连结了赤道和赤道外海区的变化,从而维持了赤道太平洋的SST暖异常态。因此,与持续的 T_e 正异常相关的局地过程和与SL信号传播相关的遥影响共同决定了2014~2015年间赤道东太平洋SST的演变。例如,在2014~2015年间,赤道中太平洋一直维持 T_e 正异常态,从而维持了赤道中东太平洋区域的SST暖异常;然而,2014年年初,一个较弱的SL负异常信号自西太平洋沿赤道向东传播,于2014年年中到达东部海盆并对那里的SST产生变冷效应,减弱了SST的暖异常。然而,这一对SST的变冷效应不足以

反转东部由 T_e 正异常维持的SST暖异常态。在这些过程中,赤道中东太平洋与次表层正的热力异常相关的局地增暖效应和与自西边界区域传播来的SL信号相关的变冷的遥影响相互抵消。

较大的SL和SST正异常于2015年年初出现在赤道中太平洋,但是此时并未有来自西边界区域传播来的SL信号。因此,此时热带西太平洋的海洋过程(如SL信号在西边界反射)对SL和SST正异常的加强并未起到主导作用。相反,较大的 T_e 正异常在赤道中西太平洋持续存在并加强,因此对2015年年初SST暖异常态的维持起到重要作用。进一步,2015年年初,SL信号的反射过程在赤道东太平洋非常明显:与2014年年末暖异常态相关的SL正异常信号沿赤道向东传播至东边界区域,经反射后在赤道外海区向西传播;2015年年初,这一SL正异常信号并入赤道中太平洋区域,这一过程加强了赤道中太平洋海区的 T_e 正异常,对SST产生增暖的作用。值得一提的是,赤道外暖水汇入赤道中太平洋区域是2015年El Niño事件变强的关键过程。正如图5b~d所示,赤道外暖信号向西传播,但是并没有在当年到达西边界(如经典理论所示),这是2015年El Niño事件的发展演变与其他El Niño事件不同的主要特征。

本文聚焦于2015年El Niño事件演变所涉及的大尺度海洋过程,其他高频过程或许同样具有重要作用,因此将在未来的分析中予以考虑。例如,如前人的研究所示,西太平洋的西风爆发(WWBs)可显著调节SST的演变,并且对El Niño事件不规则性具有重要影响(Chen等, 2015)。尤其是,观测表明强WWBs于2015年春季出现在西太平洋,或许对SST暖异常态的迅速发展起到重要作用;同样也观测到东风异常于2014年年中在中部海盆盛行(Hu和Fedorov, 2016; Liu等, 2015; Min等, 2015; Zhang和Li, 2015; Levine和McPhaden, 2016),这可用于SST暖异常态的减弱起到重要作用。因此,这种随机风场强迫及其与海洋过程的联合效应需要在分析和模拟中加以考虑。

其他低频过程对2015年El Niño事件演变的影响同样需要加以考虑,包括年代际变化和全球变暖等。正如上文所述,本文的一个重要发现是在2015年El Niño事件期间,来自东太平洋赤道外区域的正热力异常汇入赤道中太平洋区域,而这一现象并未出现在其他El Niño事件中。这主要有几个因素,除了与ENSO相关的显著的年际变化外,还包括太平洋年代际变化(PDO)。

观测表明2000~2014年间太平洋气候系统处于PDO的暖位相(但是1980~1999年间却是PDO的冷位相), 表现为热带太平洋处于SST冷异常态而北太平洋中纬区域处于SST暖异常态, 这一SST异常的跷跷板形态可能在2015年发生改变, PDO位相的转换导致2015年太平洋气候平均态的变化。此外, 全球变暖的信号在这一区域也非常明显: 在21世纪初年代际尺度的变冷趋势(即全球变暖停滞(hiatus))后, 热带太平洋SST平均场转换为变暖的趋势。同样发现, 较大的正热力异常汇入热带东北太平洋, 并伴有暖异常信号汇入赤道中太平洋。这样, 2015年El Niño事件明显地受到年代际变化和全球变暖的影响, 导致太平洋海洋平均态的年代际变化。

从气候平均态的角度, 次表层热力场(如由SL表征)在热带太平洋表现为槽脊结构: 10°N为脊, 而赤道为槽。从动力学角度, 热带-副热带太平洋存在与之相关的位势涡度(PV)形态, 表现为热带东太平洋赤道外区域为局地最小值, 这一PV形态阻碍了赤道外水团汇入赤道区域。当热带太平洋海洋平均热力状态发生变化时(如平均的热力槽-脊形态的空间结构的变化), 热带东太平洋局地平均的PV场的振幅和结构会被调制, 可导致热带太平洋热力异常的传播路径发生变化。初步分析表明, 2015年热带太平洋热力平均态和PV场的变化支持这样一个设想: 热力信号于2014年年末、2015年年初经东边界反射后在东太平洋赤道外区域向西传播并于2015年年中汇入赤道中太平洋。然而, 仍需要进一步作详细的研究来严格地回答下面这些重要问题: 为什么2015年东太平洋赤道外正热力异常可以汇入赤道中太平洋区域? 造成这种传播的驱动强迫和因素是什么? 为什么这些潜在的因素在其他El Niño事件中并未出现, 而在2015年却出现了? 类似2015年这样的传播需要什么样的条件?

这一强调过程分析的工作为2015年El Niño事件的预报提供了理论指导。目前, ENSO实时预报存在较大的偏差, 并对模式具有强烈的依赖性。各种因素对实时预报产生影响, 包括风场强迫效应(WWBs和作为对SST异常响应的大尺度风应力异常)和次表层热力效应对SST的影响(即 T_e 效应)等, 有些过程在当前很多用于ENSO预报的耦合模式中并未得到合理的表征。例如, IOCAS ICM的初步研究结果表明, 如果SST距平方程中低估了 T_e 正异常对SST的影响, 那么2015年El Niño事件的强度同样会被低估。风场强迫和次表

层热力效应对2015年El Niño事件强度的模拟和预报的相对作用需要利用耦合模式进行检验。此外, 在用于ENSO实时预报的众多耦合模式中所缺失的WWB效应, 必须要得到合理的表征, 其对SST演变的影响应与海洋过程综合考虑, 以进一步认清2015年El Niño事件中所涉及的过程。基于IOCAS ICM的更多相关敏感性试验正在进行中, 结果将在以后发表。

致谢 感谢穆穆老师和胡敦欣老师所提的宝贵意见。

参考文献

- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Weather Rev*, 97: 163–172
- Chen D, Lian T, Fu C, Cane M A, Tang Y, Murtugudde R, Song X, Wu Q, Zhou L. 2015. Strong influence of westerly wind bursts on El Niño diversity. *Nat Geosci*, 8: 339–345
- Gao C, Zhang R H. 2017. The roles of atmospheric wind and entrained water temperature (T_e) in the second-year cooling of the 2010–12 La Niña event. *Clim Dyn*, 48: 597–617
- Hu S, Fedorov A V. 2016. Exceptionally strong easterly wind burst stalling El Niño of 2014. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: 2005–2010
- Jin F F, An S I. 1999. Thermocline and zonal advective feedbacks within the Equatorial ocean recharge oscillator model for ENSO. *Geophys Res Lett*, 26: 2989–2992
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 77: 437–471
- Keenlyside N, Kleeman R. 2002. Annual cycle of equatorial zonal currents in the Pacific. *J Geophys Res*, 107: 3093
- Levine A F Z, McPhaden M J. 2016. How the July 2014 easterly wind burst gave the 2015–2016 El Niño a head start. *Geophys Res Lett*, 43: 6503–6510
- Liu B Q, Li J Y, Mao J Y, Ren R C, Liu Y M. 2015. Possible mechanism for the development and suspending of El Niño event in 2014. *Chin Sci Bull*, 60: 2136
- McCreary J P. 1981. A linear stratified ocean model of the equatorial undercurrent. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 298: 603–635
- McPhaden M J. 2015. Playing hide and seek with El Niño. *Nat Clim Change*, 5: 791–795
- Min Q, Su J, Zhang R, Rong X. 2015. What hindered the El Niño pattern in 2014? *Geophys Res Lett*, 42: 6762–6770
- Reynolds R W, Smith T M. 1994. Improved global sea surface tempera-

- ture analyses using optimum interpolation. *J Clim*, 7: 929–948
- Zebiak S E, Cane M A. 1987. A model El Niño-Southern oscillation. *Mon Weather Rev*, 115: 2262–2278
- Zhang C, Li S. 2015. Why is the El Niño event during the 2014 winter not a strong one? (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 60: 1941–1951
- Zhang R H, Zebiak S E, Kleeman R, Keenlyside N. 2003. A new intermediate coupled model for El Niño simulation and prediction. *Geophys Res Lett*, 30: 2012
- Zhang R H, Kleeman R, Zebiak S E, Keenlyside N, Raynaud S. 2005. An empirical parameterization of subsurface entrainment temperature for improved SST anomaly simulations in an intermediate ocean model. *J Clim*, 18: 350–371
- Zhang R H, Zheng F, Zhu J, Wang Z. 2013. A successful real-time forecast of the 2010–11 La Niña event. *Sci Rep*, 3: 1108
- Zhang R H, Gao C. 2016a. Role of subsurface entrainment temperature (T_e) in the onset of El Niño events, as represented in an intermediate coupled model. *Clim Dyn*, 46: 1417–1435
- Zhang R H, Gao C. 2016b. The IOCAS intermediate coupled model (IOCAS ICM) and its real-time predictions of the 2015–2016 El Niño event. *Sci Bull*, 61: 1061–1070
- Zhu J, Kumar A, Huang B, Balmaseda M A, Hu Z Z, Marx L, Kinter III J L. 2016. The role of off-equatorial surface temperature anomalies in the 2014 El Niño prediction. *Sci Rep*, 6: 19677