

石世玮, 智海, 林鹏飞, 等. 2020. 热带太平洋盐度年际变化对海表温度异常作用比较: 1997/1998、2014/2015 和 2015/2016 年 El Niño 事件 [J]. 大气科学, 44(5): 1057–1075. SHI Shiwei, ZHI Hai, LIN Pengfei, et al. 2020. Contrasting Salinity Interannual Variations in the Tropical Pacific and Their Effects on Recent El Niño Events: 1997/1998, 2014/2015, and 2015/2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1057–1075. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19172

热带太平洋盐度年际变化对海表温度异常作用比较: 1997/1998、2014/2015 和 2015/2016 年 El Niño 事件

石世玮¹ 智海¹ 林鹏飞² 陈涛¹

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

摘 要 海洋盐度变化为研究气候变化的机制提供了一个新的视角。本文通过对比 1997/1998 年、2015/2016 年两次强厄尔尼诺 (El Niño) 事件和 2014/2015 年特殊 El Niño 事件, 对盐度变化及其影响海表面温度异常 (SSTA) 的物理过程进行了比较分析。研究表明, El Niño 和南方涛动 (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) 发展的强弱与热带西太平洋大范围海表层盐度异常 (SSSA) 及其向东扩散的差异有明显关联。1997/1998、2015/2016 年赤道东太平洋 SSTA 的增暖, 对应两次强 El Niño 事件, 在发生年 4 月, 中西太平洋海域出现了明显的负 SSSA, 之后东移至日期变更线以西, SSSA 引发的混合层深度 (MLD) 变浅、障碍层厚度 (BLT) 变厚, 导致热带中—西太平洋表层升温增强, 促使了赤道中太平洋的早期变暖; 2014/2015 年弱 El Niño 事件虽然在发生年 4 月, 位于赤道中西太平洋出现了负 SSSA, 但没有发展东移, 导致 BLT 的增厚过程减弱, 对表层温度的调制作用减弱甚至消失。三次事件对应的盐度变化过程中, 水平平流和淡水通量 (FWF) 引起的表层强迫是影响盐度收支的主要因素, 水平平流影响盐度异常的前期变化, 触发事件的发生; 热带太平洋西部降水引起的 FWF 负异常的影响最为显著, 对 ENSO 异常信号出现后 SSSA 的维持起决定性作用。相比较两次强 El Niño 事件, 2014/2015 年 El Niño 对应的早期 FWF 负异常没有发展和东移, 并且之后迅速减弱, 导致中西太平洋盐度负趋势减缓, MLD 加深, BLT 变薄, 促使上表层海水冷却, 抑制了赤道东太平洋的早期变暖和 ENSO 发展。研究结果表明, 盐度变化与 ENSO 密切相关, 热带中西太平洋海域早期表层盐度变化可能可以作为 SSTA 的指数。特别地, SSSA 在调节 SSTA 时, 不仅影响它的强度, 而且可以作为判断 ENSO 是否发展及其强弱的前兆因子。

关键词 盐度异常 年际变化 强厄尔尼诺 热带太平洋

文章编号 1006-9895(2020)05-1057-19

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19172

Contrasting Salinity Interannual Variations in the Tropical Pacific and Their Effects on Recent El Niño Events: 1997/1998, 2014/2015, and 2015/2016

SHI Shiwei¹, ZHI Hai¹, LIN Pengfei², and CHEN Tao¹

收稿日期 2019-06-13; **网络预出版日期** 2020-01-15

作者简介 石世玮, 女, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化和海气相互作用研究。E-mail: shishiwei@nuist.edu.cn

通讯作者 智海, E-mail: Zhihai@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项项目 2018YFC1506002, 国家自然科学基金项目 41690122、41690120、41475101、41705055

Funded by National Key Research and Development Program on Monitoring, Early Warning and Prevention of Major Natural Disaster (Grant 2018YFC1506002), National Natural Science Foundation of China (Grants 41690122, 41690120, 41475101, 41705055)

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Ocean salinity variation provides a new insight into related ENSO (El Niño–Southern Oscillation) expressed by climate variability. In this study, salinity variations and their related dynamic processes responsible for SSTA (sea surface temperature anomaly) were extensively compared and analyzed considering two strong El Niño events, 1997/1998 and 2015/2016, and one special El Niño, 2014/2015. The study shows that the development of ENSO is significantly associated with the occurrence and eastward diffusion of large-scale SSSA (sea surface salinity anomaly) in the western tropical Pacific. In April 1997 and 2015, corresponding to two strong El Niño events, there was a significant negative SSSA in the western–central Pacific. The anomaly moved eastward to the west of the dateline, which induced a shallower MLD (mixing layer depth), and a thicker BLT (barrier layer thickness), which enhanced the surface warming in the tropical central Pacific and the early warming in the equatorial eastern–central Pacific. Although a negative SSSA occurred in the April 2014/2015 weak event in the equatorial western–central Pacific, it did not develop eastward, resulting in a weakened thickening process of the BLT and a weak modulation effect on surface temperature. For the salinity change process corresponding to three El Niño events, surface advection and surface forcing caused by FWF (freshwater flux) were the major contributors to the salinity budget. Surface advection influenced the former variability of salinity tendency, inducing the occurrence of an ENSO signal. The precipitation in the tropical western Pacific had the most significant negative influence on FWF, which played a decisive role in the SSSA occurrence and ENSO development. Compared with the two strong El Niño events, the early FWF negative anomaly in 2014/2015 did not develop, did not move eastward, and weakened rapidly; this resulted in the slowing down of the negative salinity tendency in the western–central Pacific, deepening of the MLD, thinning of the BLT, and rapid cooling of the surface layer, which inhibited early warming in the equatorial eastern Pacific. The results of this study demonstrate that the salinity change was closely related to ENSO, and early SSS in the tropical western–central Pacific could be used as an index of SSTA. In particular, SSSA not only affects the strength of SSTA in oceans, it can also be used as a precursor to judge the development and strength of ENSO.

Keywords Salinity anomaly, Interannual variability, Strong El Niño, Tropical Pacific

1 引言

厄尔尼诺—南方涛动 (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) 是全球最重要的年际异常信号, 可以驱动区域或者全球气候变化, 甚至会引发局地的气象灾害 (McPhaden, 2003)。得益于观测网络发展和对 ENSO 机制理解的加深, ENSO 的监测和预测已经取得很大的进展 (Cane and Zebiak, 1985; McPhaden et al., 1998; Latif et al., 1998; Barnston et al., 2012)。2015/2016 年厄尔尼诺 (El Niño) 过程中海表温度异常增暖从 2015 年夏季开始增强, 引发 2016 年春季历史最强的 El Niño 事件 (Mu and Ren, 2017; Santoso et al., 2017)。并且, 赤道太平洋在 2014 年春季就出现了显著海温增暖, 因此也有学者认为, 2014/2015 年的 El Niño 受到气候变化与强 El Niño 事件相互作用的影响, 从 2014

年夏季到 2016 年春季一共持续了 21 个月, 是历史上最强 El Niño 事件之一 (Jacox et al., 2016)。此次 El Niño 事件不仅有着所有强 ENSO 事件的共同特征, 而且表现出了同以往极端 El Niño 事件的显著区别 (Chen et al., 2017; Ren et al., 2017; Xue and Kumar, 2017; Zhang and Gao, 2017), 为充分理解和把握 ENSO 形态的复杂性提供了可能。通过比较分析 2015/2016 年 El Niño 与近年其他事件的变化过程, 可以更好地了解 El Niño 事件的性质和变异的动力机制, 对提高 ENSO 预测具有重要意义。

近年来, 观测发现 ENSO 的表现形态变得越来越复杂, 包括 ENSO 的空间分布和强度 (Yeh et al., 2014)。2015/2016 年 El Niño 复杂的演变过程可能和气候变化的多尺度叠加及全球变暖有关 (McPhaden, 2015), 但目前对这次事件的了解仍然有限 (刘伯奇等, 2015; Min et al., 2015; Hu and

Fedorov, 2016; Levine and McPhaden, 2016; Zhu et al., 2016), 包括 2014/2015 年热带太平洋海表面温度异常 (SSTA) 持续存在的潜在机制也不明确。这次 El Niño 的爆发让我们提出了以下问题: 什么因素促使 2015/2016 年异常增暖发展成为成熟的 El Niño 现象? 为什么 El Niño 的发展在 2014 年北半球夏季受阻? 造成两次过程明显差异的原因是什么? 此外, 强或弱 El Niño 事件是否存在其他可信的前兆信号。

众所周知, 盐度是海洋的基本状态变量之一, 它不仅可以作为全球水循环的指数, 而且参与海洋的动力过程, 通过改变海洋密度场间接地影响上层海洋的热量分布, 进而调制海洋表面温度 (Miller, 1976; Fedorov et al., 2004; Boyer et al., 2005; Huang and Mehta, 2005; Zhang et al., 2010; Corbett et al., 2017)。Lukas and Lindstrom (1991) 证明西太平洋海洋密度层结与混合层深度 MLD (Mixed Layer Depth) 直接相关, 对障碍层厚度 BLT (Barrier Layer Thickness) 有重要调节作用。障碍层变化能够抑制或者增强冷水从海洋下层进入混合层, 对海表面温度 (SST) 变化存在正反馈 (Maes et al., 2005)。同时, 海洋盐度与水平平流作用、降水和蒸发等引起的表层强迫作用以及海洋各层垂直交换作用有关 (Durack and Wijffels, 2010)。例如, Zheng and Zhang (2012) 曾利用全球海洋观测网数据 ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography), 针对 2007/2008 年 La Niña 事件, 发现其在发展阶段, 淡水通量 FWF (Freshwater Flux, $FWF = \text{蒸发}(E) - \text{降水}(P)$) 正异常通过影响中西太平洋正的海表面盐度异常 (SSSA) 导致海水密度增加, 海洋层结变化, 使 MLD 变深, BLT 变薄, 加强了海洋上层水混合, 降低了 SST, 增大了 La Niña 事件的强度。同时, 通过耦合模式模拟进一步表明热积累是 El Niño 发展的必要条件, 指出赤道西太平洋与盐度相关的 BLT 对于维持热量积累有重要作用 (Maes et al., 2005)。此外, 与海洋热结构变化有关的 SSSA 不仅可以作为 ENSO 事件的前兆, 还可以激发 ENSO 事件的发生 (Zhu et al., 2014)。这些结论和发现为进一步研究海洋的盐度提供了重要的基础。针对近年出现的 ENSO 事件, 观测发现 2014~2016 年两次 El Niño 形成演化过程中 SSSA 分布与 2009 年和 1997 年事件存在着明显区别, 2015/2016 年 El Niño 事件结合了

中部型和东部型 El Niño 的典型盐度相关模式特征 (Stramma et al., 2016), 盐度场受赤道大范围淡水异常影响, 如此大范围、大振幅的时空特征在 2004~2014 年间从未出现过 (Corbett and Subrahmanyam, 2016)。所以, 2015/2016 年 El Niño 事件中 SSSA 及对 ENSO 的调制作用需要充分的研究。

本文通过比较近期几次特殊 El Niño 事件中盐度和相关物理量的特征, 分析 El Niño 中赤道太平洋 SSTA 和 SSSA 的关系, 以探讨 SSSA 与 ENSO 事件的联系, 并找出弱 El Niño 发展停滞时的物理场特征。本文的研究从两方面进行: (1) 比较三次 El Niño 事件的 SSTA 和 SSSA 变化的关系及时空分布的差异; (2) 探究产生 SSSA 的可能物理机制及对 SSTA 的调制作用。在此目的下, 本文章节安排如下: 第 2 节给出使用的数据资料和方法; 第 3 节首先通过比较 SSTA 和 SSSA 的时空变化特征, 分析海洋盐度和温度异常的对应关系; 第 4 节分析比较了盐度相关的海洋关键物理场在 El Niño 期间的特征; 第 5 节进一步诊断盐度和温度年际变化对上层海洋 BLT 异常的影响; 第 6 节通过分析盐度收支讨论导致盐度变化的可能机制, 总结了上述 El Niño 事件中 SSSA 的差异; 最后一节通过全文的结论进一步讨论了盐度变化与强 ENSO 的关系。

2 资料和方法

采用 ARGO 和 SODA (Simple ocean data assimilation) 的三维海洋温度和盐度格点数据。ARGO 是由亚太数据研究中心 APDRC (Asia-Pacific Data Research Center) 提供、经国际太平洋研究中心 IPRC (Asia-Pacific Research Center) 处理的月平均观测资料, 空间分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, 包含 5~2000 m 深度的海洋各层月资料和长期气候态资料, 起止时间为 2005 年至今。盐度再分析资料取自海洋再分析资料 (SODA3.3.1), 盐度月平均资料长度为 1980 年 1 月至 2015 年 12 月, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 深度范围为 5~2000 m, 共 40 层。ARGO 资料和 SODA 资料表层盐度指 5 m 深度的海水盐度 (Carton and Giese, 2008)。由 ARGO 资料提供的温度资料通过减去 2005~2017 年各月气候态得到距平, 由 SODA 资料提供的盐度资料则通过减去 1980~2015 年各月气候态得到距平。本文应用的其他资料有: 全球降水气候计划 GPCP (Global Precipitation Climatology Project)

数据集提供的降水资料, 起止时间为 1979 年 1 月至今, 水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Adler et al., 2003); 蒸发量数据取自海洋—大气通量数据集 OAFlux (Objectively Analyzed Air-sea Fluxes Project) 的洋面蒸发量资料 (Yu et al., 2008), 该资料包含 1958 年至近期的全球海洋范围月平均格点数据集, 水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。

在本研究中, 利用三维盐度和温度场确定了包括 MLD 和等温层深度 ILD (Isothermal Layer Depth) 在内的关键海洋物理场。ILD 的深度计算为海水温度 T 比 10 m 温度低 ΔT 时的深度, $\Delta T=0.2^{\circ}\text{C}$ 。MLD 计算的深度为海水密度 ρ 比 10 m 密度高 $\Delta\rho$ 时的深度, 其中 $\Delta\rho$ 的取值相当于温度降低 0.2°C 对应的密度差值 (Kara et al., 2000)。此外, BLT 被定义为当 MLD 较 ILD 浅时, MLD 与 ILD 的差值 (Sprintall and Tomczak, 1992; De Boyer Montégut et al., 2004; Bosc et al., 2009)。

为了理解温度和盐度对 BLT 的有效贡献, 分析对应 ENSO 事件出现的 BLT 异常的形成机制, 采用 Zheng and Zhang (2012) 对赤道太平洋区域的 BLT 异常分析方法 (表 1), 定义 BLT 为仅依赖于温度 (T) 和盐度 (S) 的函数, 记为 $\text{BLT}(T, S)$, 其年际异常归因于温度和/或盐度的年际异常。 $\text{BLT}(T_{\text{inter}}, S_{\text{inter}})$ 表示 BLT 的年际变化分析, 其中, T_{inter} 、 S_{inter} 分别为温度和盐度的年际变化; $\text{BLT}(T_{\text{inter}}, S_{\text{clim}})$ 的分析中温度为年际变化, 盐度为气候态; $\text{BLT}(T_{\text{clim}}, S_{\text{inter}})$ 的分析中温度为气候态, 盐度为年际变化; $\text{BLT}(T_{\text{clim}}, S_{\text{clim}})$ 的分析中盐度和温度都为气候态。采用这种方法可以对某次 ENSO 过程中 BLT 异常场进行评估, 分别得到温度和盐度年际变化对其的相对影响。另外, 海表盐度变化近似表现为表层强迫、水平平流、次表层

强迫过程作用之和 (Zhang et al., 2006; Dong et al., 2009)。由于研究的区域位于热带太平洋, 定义表层强迫仅为 FWF 造成的, 利用相关资料估算上述过程对混合层盐度变化的贡献。

3 三次 El Niño 事件中 SSTA 及对应 SSSA 的时空特征

图 1 给出了 1997/1998、2014/2015、2015/2016 年三次 El Niño 中赤道平均 SSTA 的时空演变。从这三次 El Niño 事件中 SST 变化特征看, 1997/1998 年和 2015/2016 年的 El Niño 事件属于两次极端 El Niño 事件, 2014/2015 年属于一次弱的 El Niño (<http://www.pmel.noaa.gov/tao/elNiño/www> [2019-06-10])。1997/1998 年事件中, 正 SSTA 最早于发生年 1997 年的 4 月, 在赤道中太平洋日变线附近和赤道太平洋东边界两个区域同时出现 (图 1a), 赤道东太平洋正 SSTA 的强度在 2 个月内迅速发展至 2.5°C 以上, 东太平洋横跨 80 个经度的大范围正 SSTA 一直持续到次年 4 月才逐渐减弱消失。相比之下, 虽然 2014 年 2 月在日变线西侧以及之后 6 月在赤道东太平洋也出现了正 SSTA, 但这两个区域的正 SSTA 没有继续发展且强度减弱 (图 1b)。2014 年 10 月, 赤道东太平洋再一次发生了异常增暖事件, 但该范围的正 SSTA 只持续了 2 个月就突然消失, 这次国内外各科研机构预测的“强 El Niño”立刻终止 (Lian et al., 2017)。直到 2014 年 11 月, 日变线西侧再次变暖并缓慢向东扩展, 次年 6 月正 SSTA 开始迅速增长。赤道东太平洋的 SSTA 在 2015 年 4 月迅速回升至 2°C 以上, 之后该区域的正 SSTA 缓慢向西扩展 (图 1c), 一直持续到 2016 年 4 月, 发生了一次超强 El Niño 事件。

与一般发生在 6 月的 El Niño 事件不同, 1997/1998 年和 2015/2016 年两次极端 El Niño 事件, 开始时间都在春季 3、4 月, SSTA 发展迅速, 强度大, 持续时间长 (Zhang and Gao, 2017)。相对于 1997 年极端 El Niño 中 SSTA 持续且连贯的演变, 2015 年事件前期赤道太平洋海温表现不同以往, 发展中期 SSTA 高值范围更集中且位置偏西, 使得两次事件的空间形态有些许不同。以偏东区域的 Niño3 指数判断, 2015/2016 年 El Niño 强度略低于 1997/1998 年, 但由于从 2014 年秋季到 2015

表 1 由温度场和盐度场计算 BLT 变化的方法, 温度和盐度可以被看作是气候变化或年际变化的

Table 1 Methods of BLT (Barrier Layer Thickness) variability calculated by temperature and salinity fields, which can be considered to be interannual or climatologically varying

分解计算BLT	温度和盐度的气候态和年际变化选取情况
$\text{BLT}(T_{\text{clim}}, S_{\text{clim}})$	气候态温度和气候态盐度
$\text{BLT}(T_{\text{inter}}, S_{\text{inter}})$	温度的年际变化和盐度的年际变化
$\text{BLT}(T_{\text{inter}}, S_{\text{clim}})$	温度的年际变化和气候态盐度
$\text{BLT}(T_{\text{clim}}, S_{\text{inter}})$	气候态温度和盐度的年际变化

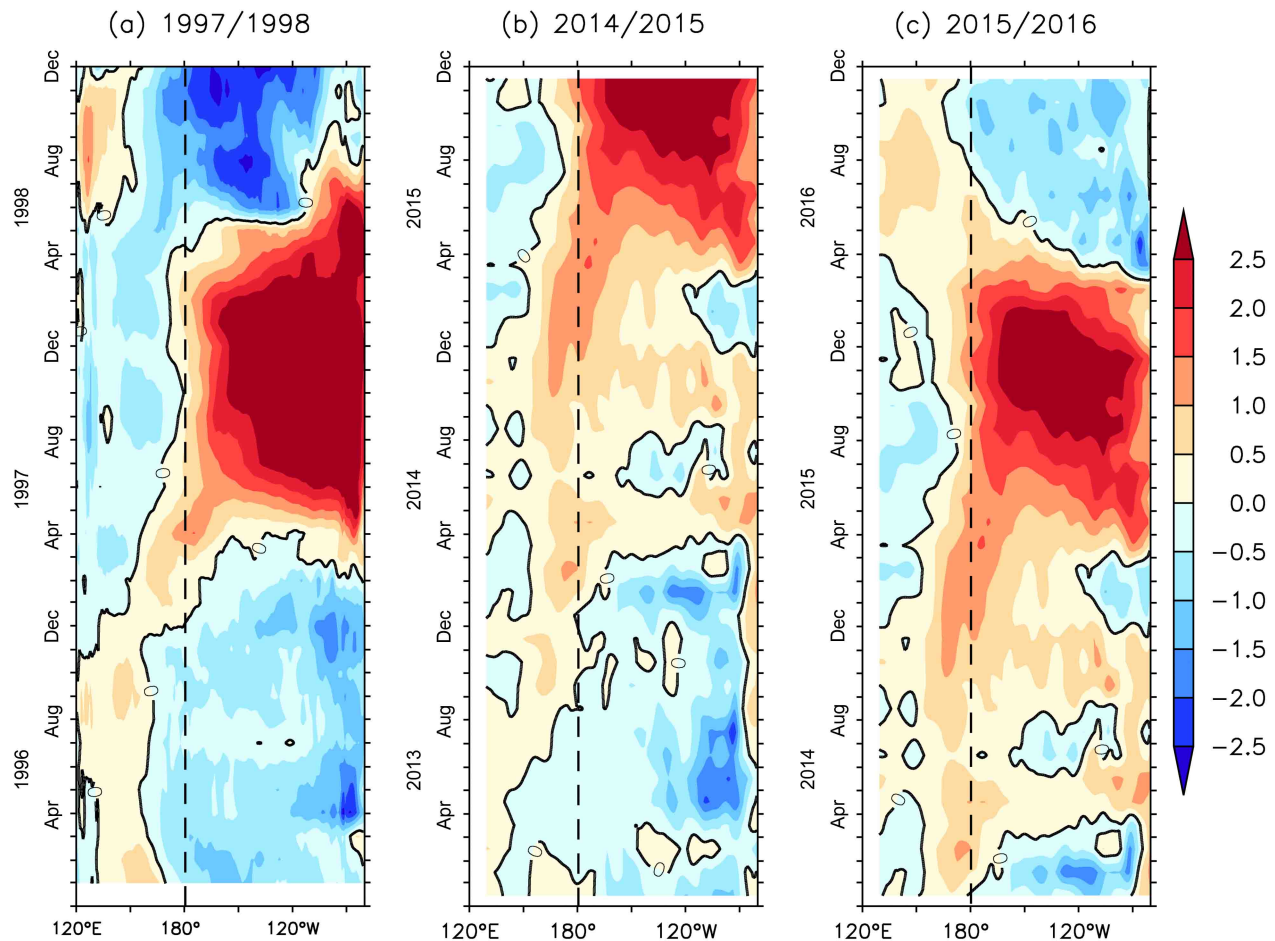


图1 El Niño 期间赤道 ($2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$) 平均海表面温度异常 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的时间—经度图: (a) 1997/1998 年; (b) 2014/2015 年; (c) 2015/2016 年。黑色虚线表示日期变更线

Fig. 1 Longitude–time sections of SST (sea surface temperature) anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$) averaged in the equator ($2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$) during El Niño events for (a) 1997/1998, (b) 2014/2015, and (c) 2015/2016. The black dashed lines represent the location of the international dateline

年春夏赤道中西太平洋出现了明显增暖且存在显著峰值 (图 1b), 从 Niño4 指数看, 2015/2016 年事件的强度显著上升 (Lian et al., 2017)。2014/2015 年这一次弱的增暖过程被广泛认为对 2015/2016 年极端 El Niño 事件的维持起到重要作用, 后者不同于以往历史 El Niño 事件的空间形态也可能与这次弱 El Niño 的潜在机制有关 (Zhang and Gao, 2017)。

盐度作为海洋的基本要素之一, 通过影响海洋密度及层结, 影响不同层结之间的热量垂向传输, 对 ENSO 事件的发展具有重要调节作用 (Zhi et al., 2015)。赤道太平洋的暖池—冷舌交汇区 (日变线附近) 是 ENSO 事件发生、发展的主要区域, 具有复杂的热盐结构, 存在着强温度和盐度锋面, 与 SSSA 和 SSTa 的发展密切联系, 其变化与 ENSO 事件的发生、发展同期进行, 因此该区域的温度和盐度变化往往能作为 ENSO 事件的信号

(Maes et al., 2006; Wang and Liu, 2016; 王凡等, 2018)。

为了具体描述 SSSA 对应 SSTa 的变化, 图 2 给出 SSSA 在三次 El Niño 事件中的时空演变过程。在 El Niño 发生前一年 (图 2a), 日变线以西的赤道中西太平洋暖池大范围区域一直维持有正 SSSA, 而从 1996 年末到 1997 年初, 在西太平洋边界位置首次出现了较弱的负 SSSA, 其随时间向东传播的路径与这一时段 SST 暖异常存在一定相似性; 在 El Niño 发生当年 1997 年 4 月, 在日变线西侧 170°E 出现明显的负 SSSA, 且负 SSSA 强度迅速增大, 向赤道中东太平洋扩展。在 1997 年春季, 日变线附近 SSS 由正异常转变为负异常。直至 1997 年冬季 El Niño 强盛时期, 赤道中太平洋的负 SSSA 范围延伸到整个赤道中东太平洋。

与 1996/1997 年 El Niño 相似, 从 2013 年末

到 2014 年初, 尽管日变线附近存在正 SSSA, 在西太平洋边界存在的小范围负 SSSA 中心开始缓慢东传 (图 2b)。接着在 2014 年春季较强的负 SSSA 出现在了日变线西侧, 同样可以看到这一区域的 SSSA 出现了明显的正负异常转变。但这一负异常并未像 1997/1998 年事件一样在夏季持续发展, 相反地, 其强度逐渐减弱并缓慢西退。这一负 SSSA 的西退对应着同期正 SSTa 的发展停滞。可以看到从 2014 年夏季到 2015 年春季, 赤道东太平洋都没有显著的盐度变化, 日变线附近的盐度趋近于平均态。直到 2015 年春季 3 月, 与 1997 年和 2014 年春季一样, 再次在日变线西侧的 $160^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$ 范围内出现了显著的负 SSSA, 对应着又一次 El Niño 事件的发生。尽管在 2015/2016 年事件发生前, 赤道中西太平洋 SSS 可能受到前一年盐度变化的影响, 在 El Niño 发生年春季日变线附近没有从显著正异常转变到负异常的过程, 从而与 1997/1998 年

事件发生前期的正 SSSA 状态有所不同, 但在 2015 年 4 月, 位于赤道中太平洋 $160^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$ 范围的负 SSSA 迅速、强烈地发展, 沿赤道向东延伸扩张 (图 2c), 表现出与 1997 年 El Niño 发展时期一致的空间演变形态, 这一区域的负异常在 2015/2016 年持续时间甚至比 1997/1998 年更长。

三次过程中 SSS 变化展现出了清晰的区域性特征, 即在日变线西侧都有显著的负 SSSA, 其持续时间和强度的发展都与 SSTa 一样表现出较为一致的时间演变特点。在这三次事件中, 盐度呈现较为明显的同期甚至是超前变化。对应暖异常发生前期, 日变线附近也发生了 SSS 正负异常的转变; 在 El Niño 发生和发展时期, 正 SSTa 存在区域的西侧位置伴随显著的负 SSSA 出现, 并一直持续到暖异常减弱消失。其中两次强 El Niño 事件中, 2015 年的负 SSSA 高值区 (绝对值大于 0.05 psu) 范围比 1997 年偏小且位置偏西, 这与对应 SSTa 空间

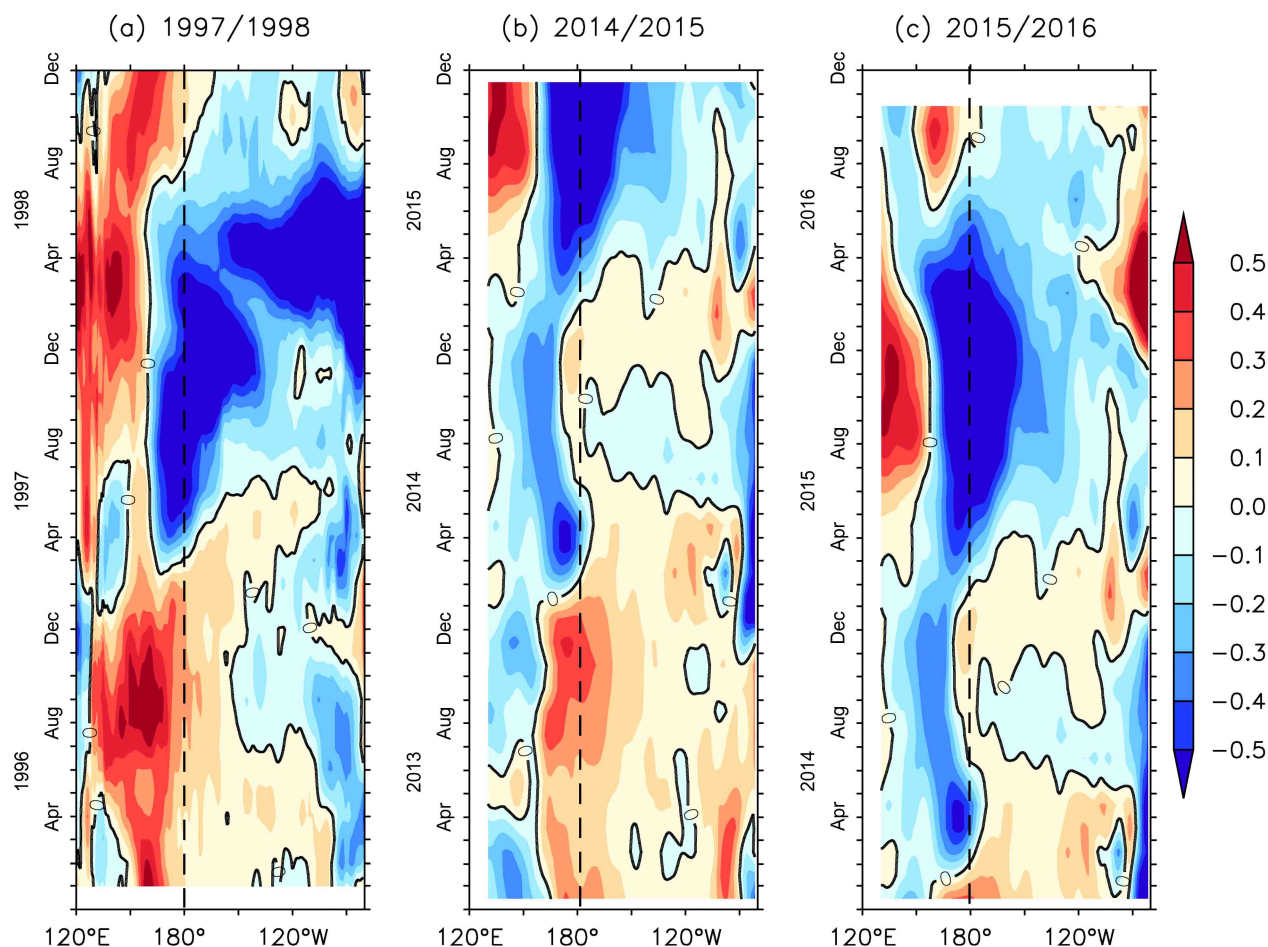


图2 同图1, 但为海表面盐度异常 (SSSA, 单位: psu)

Fig. 2 As in Fig. 1, but for SSS (sea surface salinity) anomalies (SSSA, units: psu)

分布的不同表现相吻合。2014/2015 年海温异常增暖的中止, 也对应了盐度异常负变停滞、弱的负 SSSA 区域西退的过程。

为了进一步量化分析 El Niño 中的海洋盐度沿赤道纬向移动, 图 3 分别给出沿赤道的 Niño3、Niño3.4、Niño4 三个特殊区域的平均 SSSA 在三次事件中随时间变化情况。根据 El Niño 期间盐度变化的显著区域特征, Niño4 区域平均 SSSA (图 3a) 更清晰地反映日变线附近的赤道中西太平洋区域的盐度随时间的演变特征。1997 年 4 月, Niño4 区域平均 SSSA 首次出现负异常, 负异常持续增长并在 1997 年 11 月达到峰值 -0.5 psu, 之后负异常随着 El Niño 事件的结束逐渐回归平均态。2014/2015 年 El Niño 发生前一年同 1997/1998 发生前一年的 SSSA 表现一致, 并且之后都在 El Niño 发生前的春季开始出现负增长, 但 2014 年这一负变化

的持续时间短, 在 5 月达到峰值 -0.2 psu 随即缓慢增加到平均态。2015 年 1 月 Niño4 区域 SSSA 再次开始出现负异常, 之后变化趋势与 1997/1998 年 El Niño 变化一致, 2015 年冬季的峰值比 1997 年大, 达到 -0.7 psu。

比较而言, Niño3.4 区的盐度变化比 Niño4 区滞后 2~3 个月。2014/2015 年和 2015/2016 年, 两个不同区域的变化过程相似, 但 1997/1998 年, Niño3.4 区域的 SSSA 变化出现了两个显著极小值, 分别在 1997 年 12 月达到 -0.5 psu, 以及在 1998 年 5 月达到 -0.6 psu。另外, 从 Niño3 区看, 1997 年末到 1998 年春季的负 SSSA 显著增强, 1998 年 4 月也存在一个极小值, 达到 -0.7 psu。与之不同的是, 2014/2015 年和 2015/2016 年 El Niño 的这一区域的盐度变化都趋近于平均值, 负异常最大值不超过 -0.2 psu。Niño3 区盐度变化的不同强弱也反

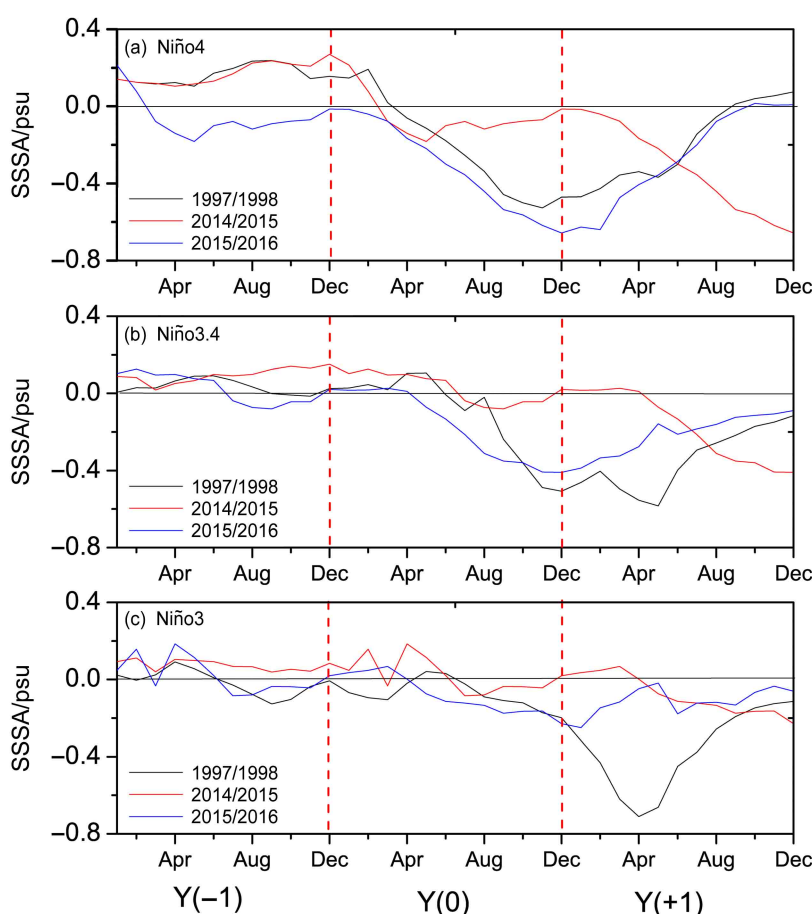


图 3 1997/1998 年 (黑色线)、2014/2015 年 (红色线)、2015/2016 年 (蓝色线) 三次 El Niño 期间 (a) Niño4 区、(b) Niño3.4 区、(c) Niño3 区区域平均海表面盐度异常 (单位: psu) 的季节变化。黑色水平线为零线, 红色虚线为年分界线

Fig. 3 Seasonal variability of SSS anomalies during El Niño events for 1997/1998 (black lines), 2014/2015 (red lines), and 2015/2016 (blue lines) averaged over (a) Niño4 box, (b) Niño3.4 box, and (c) Niño3 box. The horizontal black lines represent zero, and the red dashed lines separate the years

映了三次事件发生发展区域和范围的差异。

同时发现两次强 El Niño 事件中 Niño4 区负 SSSA 从发生年的春季开始显著增强, 1997/1998 年和 2015/2016 年负变率大小相同, 3 个月降幅达到 -0.2 psu。但两者在 El Niño 发生前一年的 SSSA 表现不同, 2015 年可能受到 2014 年过程的影响, 使得 2015/2016 年 Niño4 区域的负 SSSA 峰值异常高。2014/2015 年 El Niño 中, 负 SSSA 虽然出现但持续增长时间短, 负异常的中断是这一次弱过程与两次强过程最主要的区别。

4 ENSO 期间盐度相关的海洋物理场的特征

海洋混合层和障碍层是盐度影响海洋热动力过程的关键物理场, SSSA 通过密度变化影响海洋上层结的垂直分布。Maes et al. (2005) 利用耦合模式证明, 障碍层的缺失使得海水层结间混合夹卷

作用更加明显, 一方面加强的热量垂直输送使海表面热积累减少、海表冷却; 另一方面促使大气与海洋耦合, 产生的向东流携带暖池暖水向东太平洋输送。相互作用下热积累整体减少导致 SST 增暖减弱。模式中如果消除障碍层的作用, El Niño 可能会减弱、中断或者不再发生 (Maes et al., 2002, 2005)。因此障碍层的存在对 ENSO 的发生和发展非常重要。为了探究三次事件中 SSS 与 SST 的动力关系, 首先分析 MLD 和 BLT 在 El Niño 期间的变化。

1997/1998 年 El Niño 中 (图 4a), 在 1996 年 10 月, 日界线以西的热带太平洋 $150^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$ 区域开始出现 MLD 负异常, 异常中心持续东移。同样是在 El Niño 发生前一年 2013 年的 10 月, 这一区域也出现了弱的负异常, 但其并没有像 1996 年 10 月的负异常一样继续发展东传, 反而重新回归平均态, 甚至出现了微弱的 MLD 正异常, 这是

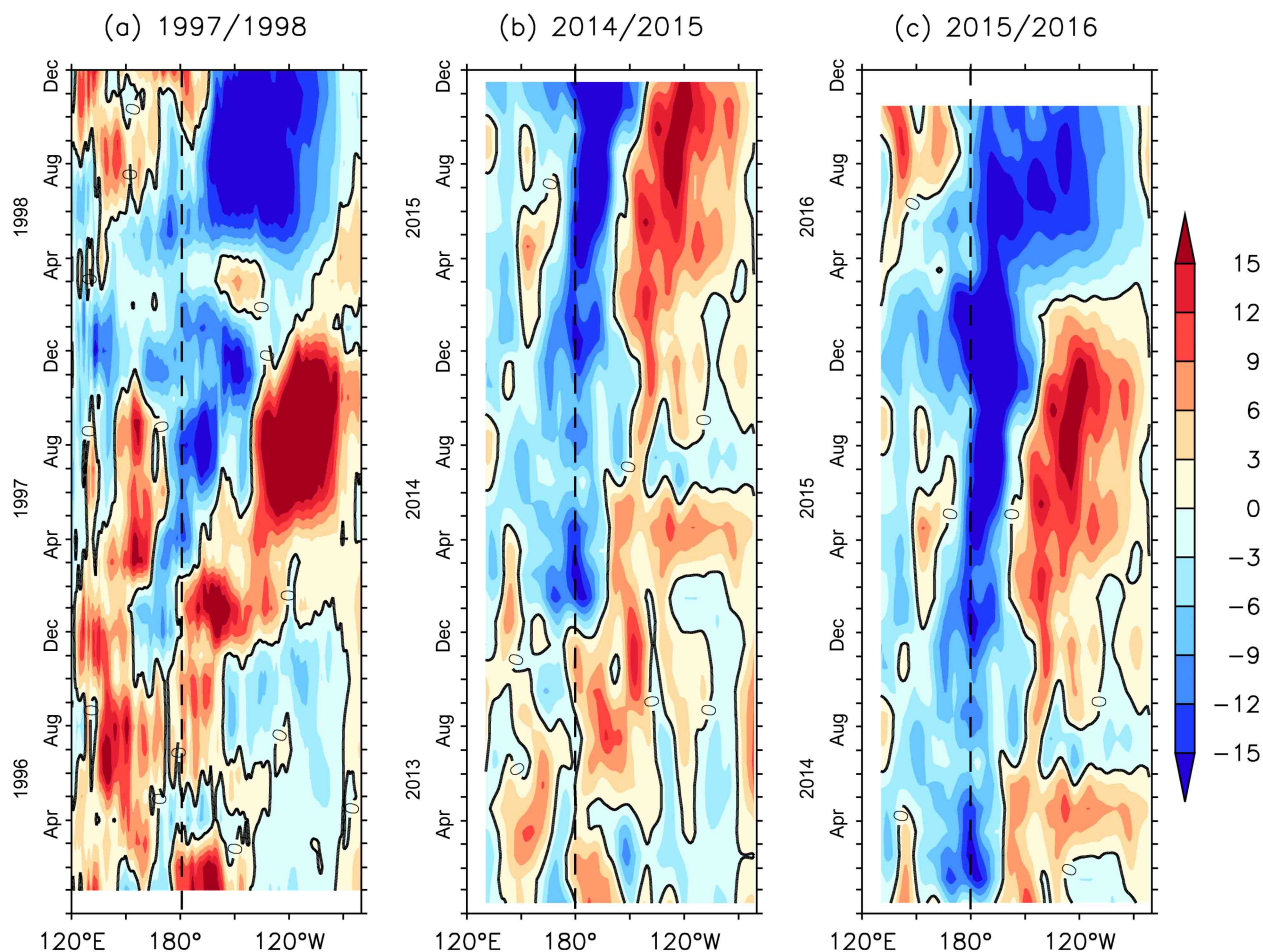


图4 同图1, 但为混合层深度 (MLD) 异常 (单位: m)

Fig. 4 As in Fig.1, but for MLD (mixing layer depth) anomalies (units: m)

2014/2015 年事件中, MLD 负异常发展的第一次间断 (图 4b)。1997 年的春季和夏季, MLD 负异常在日变线以东 $180^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$ 范围内持续增大, MLD 变浅 15 m 以上, 这一负异常沿赤道向东太平洋传播。类似地, 2014 年 2 月, 日变线附近 MLD 再一次明显变浅, 但这一次 MLD 变浅过程只持续 5 个月左右, 并且没有像 1997 年一样出现负异常中心的东移和延伸。6 月, MLD 负异常发展出现第二次间断, 之后在整个 2014 年夏季都没有明显变浅, 持续了近三个月的异常“衰弱”。直到 2014 年秋季, 日变线附近出现负 MLD 异常, 中心值达 9 m, 这也是 2015/2016 年 El Niño 的开端, 两个月后这一 MLD 负异常迅速增长到 -15 m 以上, 其范围像 1997 年一样随着 El Niño 事件的发展向东扩展, 在 El Niño 发生当年冬季延伸到了 140°W 。三次过程中都伴有起始于西太平洋的正 MLD 异常中心的东移, 并在 El Niño 年冬季达到峰值后迅速

减弱, 消失在太平洋西边界。

从三次事件中对应的障碍层特征来看, 在 El Niño 期间都伴随有西太平洋 BLT 正异常的加强且东移的现象 (图 5)。1996 年在西太平洋存在厚度 15 m 以上的障碍层, 从 1996 年冬季开始, 厚的障碍层逐渐东移加厚, 并在 1997 年春季东移至日变线位置, 此时日变线西侧 $150^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ 范围内有 BLT 的显著增厚, 值得注意的是在同一时期这一区域也出现了显著的负 SSSA, 之后障碍层位置由原来的日变线西侧向东移动并持续增厚。在 1997 年冬季 El Niño 发展鼎盛时期, 日界线以东的中东太平洋障碍层为大范围显著正异常, 其异常的范围可以达到 40 个经度, 持续时间从 El Niño 当年 8 月到次年初春, 这与 1997 年负 SSSA 的演变过程一致。在 2014/2015 年弱事件中, 西太平洋显著障碍层厚度达 15 m, 2014 年春季向东移动到达日变线之后出现了停滞并逐渐变薄, 这对应了同期该区

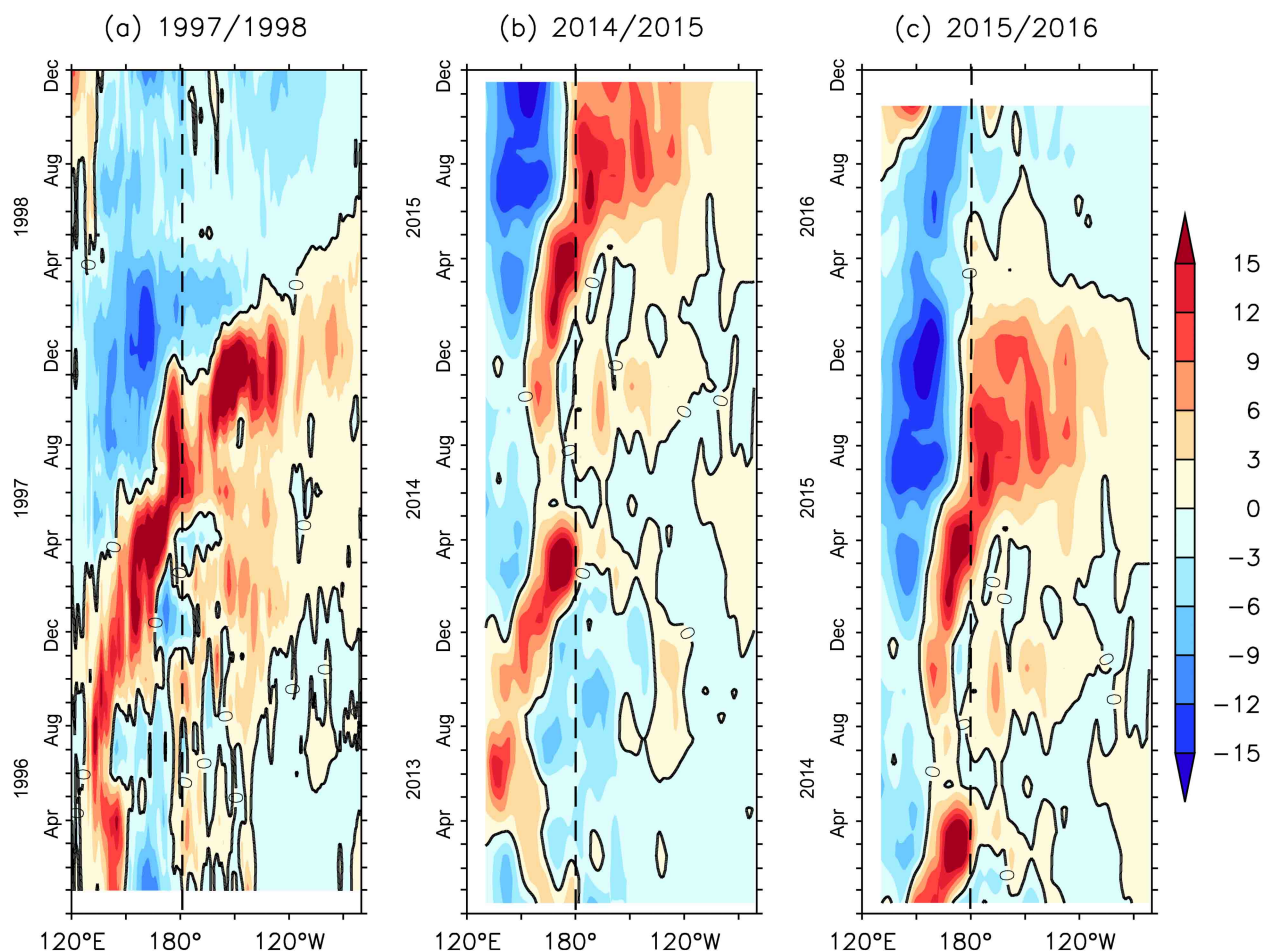


图 5 同图 1, 但为障碍层厚度 (BLT) 异常 (单位: m)

Fig. 5 As in Fig. 1, but for BLT (barrier layer thickness) anomalies

域负 SSSA 的发展中止和西传。直到 2014 年末日变线西侧再一次出现了正 BLT 异常, 随着 2015/2016 年 El Niño 事件的发展, 正 BLT 异常沿赤道逐渐东移。

2015 年 BLT 正异常高值区域 (大于 12 m) 较 1997 年偏西, 也就导致了 2015 年年中海表热量在 Niño3.4 区积聚更多, 部分解释了用 Niño3.4 指数判断 El Niño 强度显示 2015/2016 年事件强于 1997/1998 年事件的原因。2014 年初夏, 赤道中太平洋 MLD 变浅趋势中断、BLT 增厚停滞, 导致该区域垂向热量输送得以维持, 海表热量不能持续积累, 显然是此次弱事件正 SSTA 未能继续发展的原因之一。

5 盐度变化对海洋障碍层的调制

根据障碍层定义, BLT 变化主要受温度和盐度共同影响。Zheng and Zhang (2015) 曾在对 La Niña 事件的研究中详细分析了 BLT 与温度和盐度的关系。更有研究表明, 虽然温度对同温层有决定作用, 赤道中西太平洋的盐度变化对混合层厚度、密度、层结的作用比温度还要大, 盐度是影响赤道太平洋垂直夹卷过程变化的决定性因素, 因而在 ENSO 期间障碍层的年际变化主要归因于盐度的变化 (Miller et al., 1976; Lukas and Lindstrom, 1991; Zheng and Zhang, 2015; Zhi et al., 2016; 王凡等, 2018)。热带太平洋日变线附近的盐度场通过改变海水密度来调控太平洋表层 MLD, 间接影响 BLT 的年际变化。例如, El Niño 事件中, 中西太平洋的障碍层限制了海洋的热量和动量垂向交换, 导致表层热量积聚, 最终使得 SSS 对 SST 产生正反馈作用。

在三次 El Niño 事件中, BLT 异常的时空演变特征和 SSSA 变化表现出比较清晰的对应关系。为了分辨三次过程中盐度和温度的变化对障碍层的贡献, 利用了 Zheng and Zhang (2015) 的方法 (表 1) 来验证 El Niño 期间的 BLT 异常对温度和盐度的年际变化的敏感性。

图 6 给出了三次事件中不同性质影响因子下的 BLT 异常随时间演变的时间—经度图。图 6a 为 $BLT(T_{inter}, S_{inter})$ 和 $BLT(T_{clim}, S_{clim})$ 的差异, 记为 $BLT(T_{inter}, S_{inter})$, 表示 BLT 受年际温度和年际盐度影响的年际变化量, 图 6b、c 分别为 $BLT(T_{inter}, S_{clim})$ 、 $BLT(T_{clim}, S_{inter})$ 与 $BLT(T_{clim},$

$S_{clim})$ 的差异, 记为 $BLT(T_{inter}, S_{clim})$ 、 $BLT(T_{clim}, S_{inter})$ 。从图中看到对于三次事件对应的 $BLT(T_{inter}, S_{inter})$, 从 El Niño 发生年冬季到次年春季在热带中西太平洋出现了明显的 BLT 正异常, 这在上节已经进行了详细的论述。对比 1997/1998 年事件的 T_{inter} 和 S_{inter} 对 BLT 异常的贡献, 发现对应仅取 S_{inter} 的 BLT 在相同的区域出现了 BLT 正异常, 而仅取 T_{inter} 作为变量的 BLT 没有出现对应区域的正异常 (图 6a)。其他两次 El Niño 事件相应都表现出 BLT 对 S_{inter} 的敏感性, 在热带中西太平洋出现了相似的 BLT 异常变化 (图 6b、c)。两次超强 El Niño 中, 从 El Niño 当年 6 月开始, 日变线以东 $160^{\circ}W$ 附近仅考虑盐度年际变化影响的 BLT 开始出现了明显的正异常, 同等强度的异常值持续到次年春季; 而在 2014 年夏季, 日变线附近没有出现比较明显的正异常, 盐度的作用微弱。

综合这三次事件障碍层的变化特征可以发现, 在 El Niño 发生、发展时期, 盐度异常是调节 BLT 的主要因子。El Niño 当年春季, 盐度迅速减弱使得 BLT 变厚, 对热量在表层的积聚产生了正反馈作用。2014/2015 年 El Niño 中, 弱的 SSSA 也表现出了相同的对应关系。进一步验证了 El Niño 事件中关键区域 BLT 变化和 SSSA 的关系。因此可以认为, 2014 年夏季盐度的弱异常导致的障碍层弱变化, 使得表层热积累较弱。

6 海表盐度年际变化的原因

6.1 海表层盐度趋势及收支

从前文得出, SSSA 及其趋势的强弱不同, 造成对海表面温度积累的反馈过程有显著差异, 最终影响了 1997/1998 年和 2015/2016 年两次强 El Niño 和 2014/2015 年这一次特殊的弱过程。我们可以从海表层盐度趋势的变化 (图 7) 进一步分析三次不同强弱的 El Niño 中 SSSA 随时间变化差异, 并通过其收支项分析产生差异的原因。

对应在 1996 年冬季出现的盐度负异常, 赤道西太平洋的盐度负变化趋势从 1996 年秋季开始出现并东移, 在 1997 年 2 月到达日变线并迅速达到了 $-0.2 \text{ psu month}^{-1}$, 超前日变线附近显著盐度变化 2 个月左右, 2014/2015 年 El Niño 前期过程也与之类似。之后中太平洋日变线以西 $170^{\circ}E \sim 180^{\circ}$ 范围的负盐度趋势区域逐渐东传, 直到 1997 年 6 月, 日变线以东区域的趋势负异常消失, 2 个月

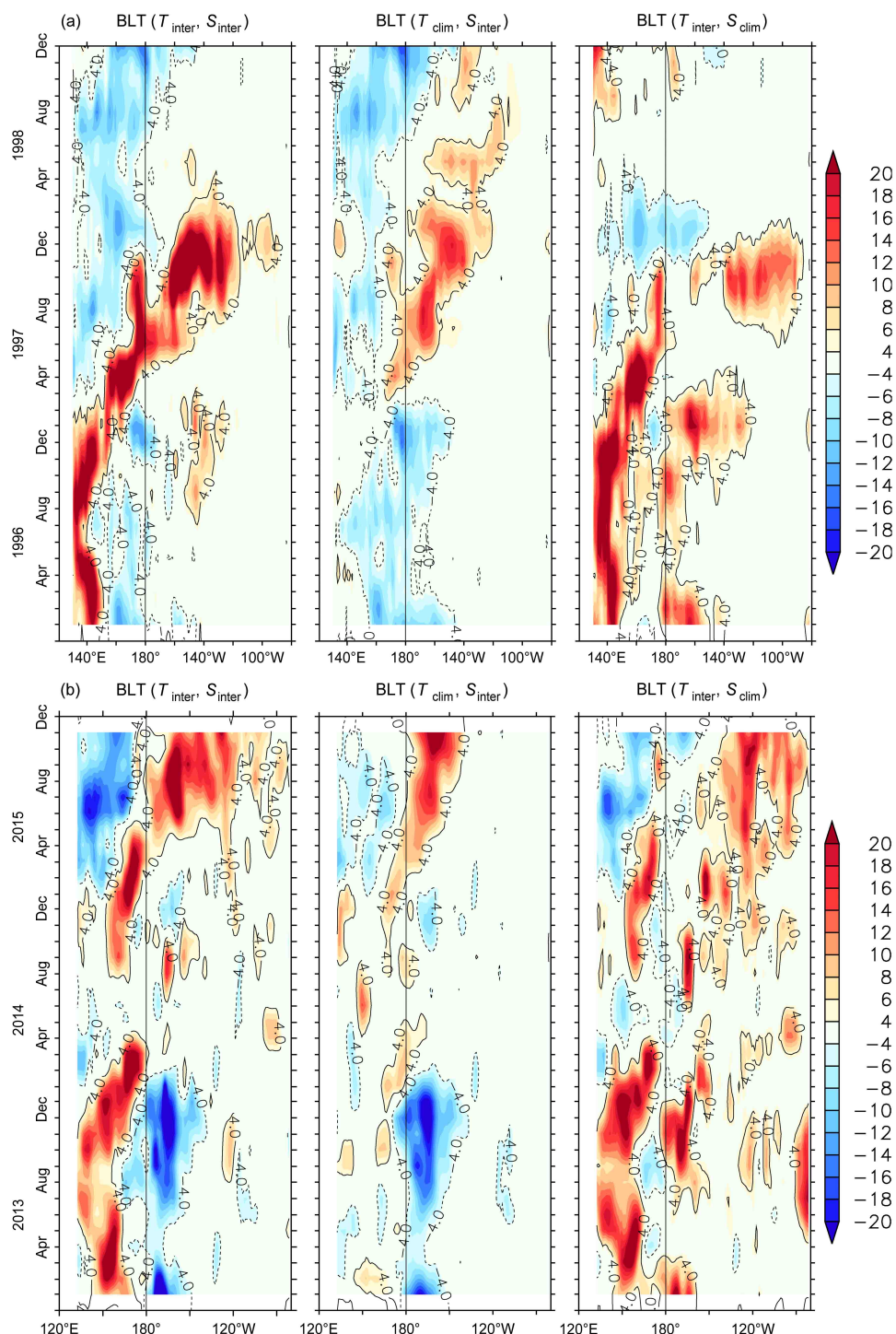


图 6 El Niño 期间盐度和温度影响下的赤道 (2°S~2°N) 平均障碍层厚度异常 (单位: m) 的时间—经度分布: (a) 1997/1998 年; (b) 2014/2015 年; (c) 2015/2016 年。左图表示盐度年际变化和温度年际变化共同作用下的障碍层厚度变化, 记为 $BLT(T_{inter}, S_{inter})$, 中图表示仅盐度年际变化影响的障碍层厚度变化, 记为 $BLT(T_{clim}, S_{inter})$, 右图表示仅受温度年际变化影响的障碍层变化, 记为 $BLT(T_{inter}, S_{clim})$ 。黑实线表示日期变更线

Fig. 6 Longitude-time sections of BLT anomalies (units: m) averaged in the equator (2°S~2°N) under the influence of salinity and temperature during El Niño events in (a) 1997/1998, (b) 2014/2015, and (c) 2015/2016. The results of left figures were obtained from interannual temperature and interannual salinity fields [$BLT(T_{inter}, S_{inter})$], the results of middle figures were obtained from interannual temperature and climatological salinity fields [$BLT(T_{clim}, S_{inter})$], and the results of right figures were obtained from interannual salinity and climatological temperature fields [$BLT(T_{inter}, S_{clim})$]. The black lines represent the location of the international dateline

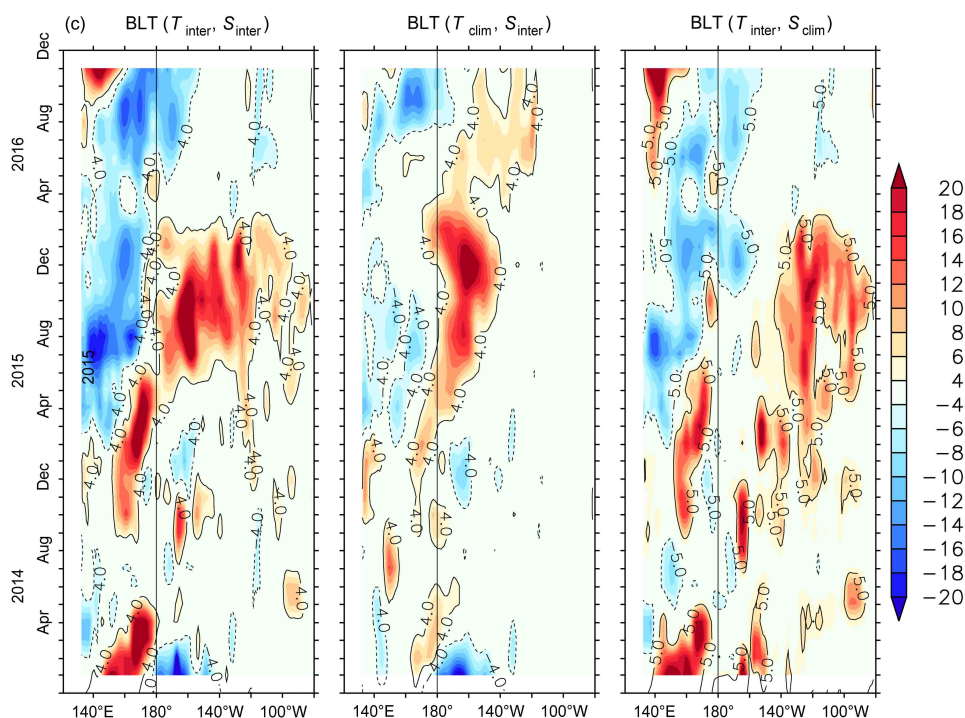


图 6 (续)
Fig. 6 (Continued)

之后又在相同位置再次出现并继续东移。2014 年春季, 到达日变线附近的盐度趋势负异常与 1997 年春季一样, 在日变线以西发展和维持, 不同的是其没有继续向日变线以东移动, 并且在负异常迅速减弱消失后, 该区域出现了显著的盐度趋势正异常, 2014 年夏季 6 至 7 月, 盐度的正变趋势迅速增大到 $0.2 \text{ psu month}^{-1}$, 其西侧区域存在弱的负变化趋势, 对应了盐度负异常在日变线附近的迅速减弱和西退 (图 7b)。直到 2015 年 1 月, 日变线以西的盐度趋势负异常开始显著增大到 $-0.2 \text{ psu month}^{-1}$ 并向日变线以东移动, 2015 年这一显著负异常强度不及 1997 年, 但其维持在 $-0.1 \text{ psu month}^{-1}$ 以上的持续时间比 1997 年长 2~3 个月 (图 7c)。

1997/1998 年和 2015/2016 年两次强 El Niño 事件中, 随着 El Niño 的减弱, 热带东太平洋的盐度负变化趋势减小并开始转为正变化趋势。例如, 在 1998 年 4 月和 2016 年 2 月盐度趋势迅速由负转正, 且在正盐度趋势开始大范围出现并增强时, SSTa 在同期或者 1~2 个月之后开始迅速减弱, 表现出事件结束的信号。而 2014/2015 年弱 El Niño 中, 在发生年的 8 月, 盐度的变化趋势出现了明显的由负转正。因此, 在 El Niño 发生当年的春夏季位于日变线附近及东侧海域的盐度趋势是否

发生正负异常的转变以及盐度是否开始迅速增大可能可以作为一个判断 El Niño 事件是否继续发展及其强弱的参考。

我们提出的问题关键在于, 造成三次过程日变线附近 SSSA 迅速减弱的原因是什么, 以及在 2014 年夏季, 是什么导致 SSS 突发显著正变化, 从而“抑制”了这一次 El Niño 事件的发展。

影响热带 SSS 收支的主要因子有水平平流、次表层强迫作用和 FWF 引发的表层强迫, 如果仅将研究范围定在热带太平洋, 忽略小范围的垂直混合过程, 那么盐度收支简单地理解为由表层的水平平流、淡水通量作用和混合层底部的夹卷作用组成 (Zhang et al., 2006; Zhi et al., 2019)。对应盐度趋势分别给出了三次事件中 Niño3 和 Niño3.4 区域平均的盐度收支项的时间演变, 以了解 El Niño 事件中各项因子对盐度变化的贡献 (图 8 和图 9)。

热带太平洋 SSSA 主要受水平平流和表层强迫的影响 (Hasson et al., 2013; Gao et al., 2014)。比较 Niño4 区盐度趋势的各项收支 (图 8) 发现, 从 El Niño 前一年到发生年春季, 表层强迫的负作用不明显, 水平平流贡献曲线与盐度趋势变化曲线基本一致, 表明三次事件发生前及过程前期, 盐度趋势的变化主要由平流过程影响。其中, 1996 年水

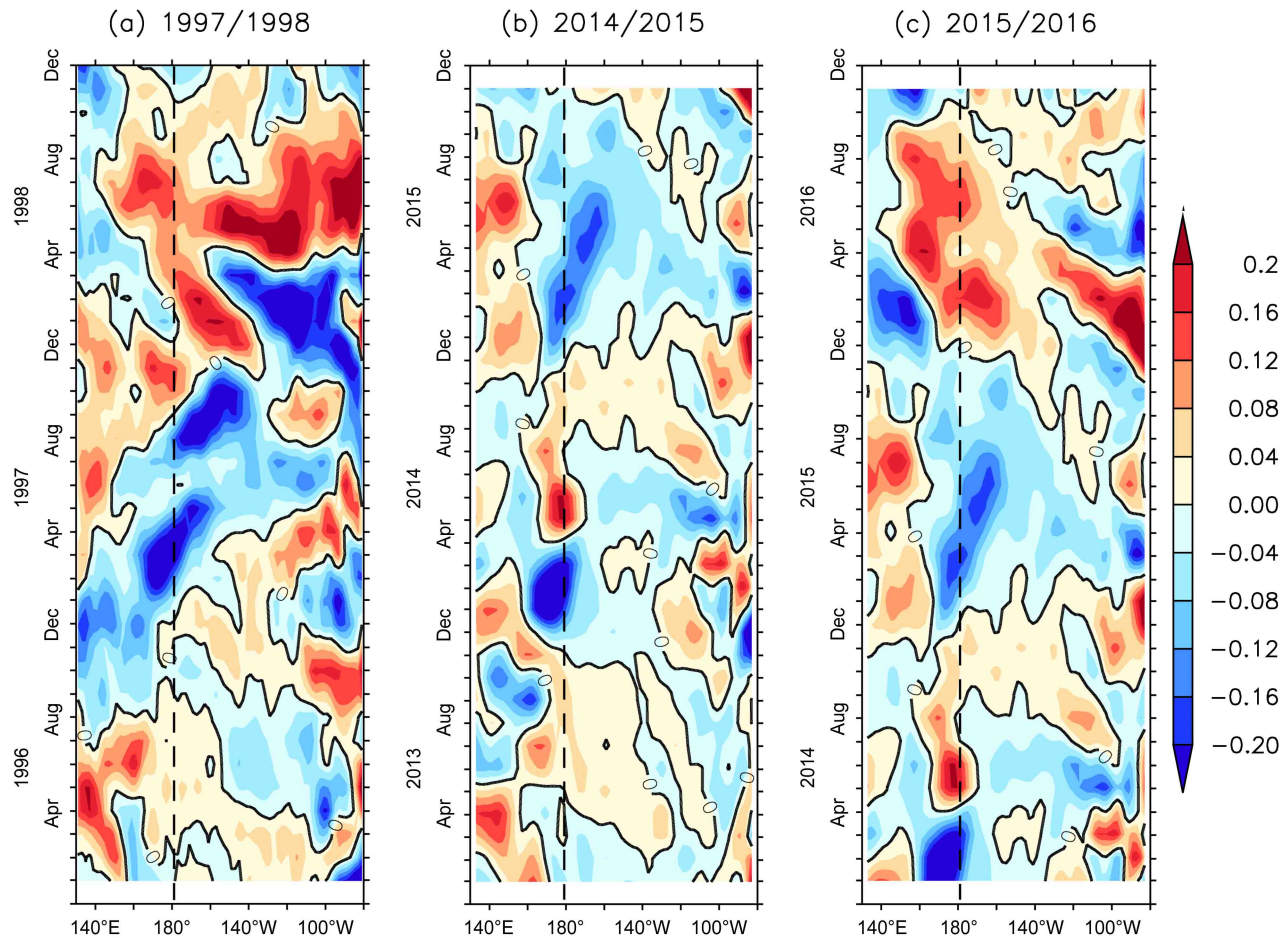


图7 同图1, 但为混合层盐度趋势 (单位: psu month^{-1})

Fig. 7 As in Fig. 1, but for MLS (mixing layer salinity) tendency (units: psu month^{-1})

水平平流一直表现为负作用, 出现两次极小值, 负作用维持到 1997/1998 年事件发生年的六月; 2014 年表现为正作用, 进入冬季后转变为微弱的负贡献, 之后负作用也维持到 2015/2016 年事件发生年 6 月; 弱过程中, 2013 年为负作用, 但这一年水平平流负作用与两次强过程不同, 仅仅维持到 2014 年春季 3 月就转变为正作用。事件发生前, 受水平平流影响盐度趋势的正负强弱变化并没有统一的特征, 但 El Niño 即将发生时, 水平平流开始出现负作用, 使得盐度趋势转负, 进而使得日变线附近在事件发生年春季出现负 SSSA。直到 El Niño 进一步发展, 其贡献开始由负转正, 之后盐度负趋势的维持主要依靠表层强迫的作用。

随着 El Niño 的发展, 从发生年春季开始, 表层强迫的影响逐渐增强, 对负 SSSA 的增大起重要作用。表层强迫对盐度趋势的负作用在两次强 El Niño 事件中贡献明显, 大小一致。而 2014/2015 过

程中, 虽然表层强迫在 2014 年 2 月短暂地表现出负作用, 但其影响从 4 月开始减弱。比较 1997/1998、2015/2016 年强过程和 2014/2015 年弱过程, 弱过程中水平平流的负作用比强过程提前 3 个月转变为正作用, 再加上表层强迫负作用的缺失, 使得盐度异常负趋势不能维持, 最终仍表现为盐度迅速增大的趋势, 而未出现持续显著的负 SSSA。

通过对水平平流作用的线性分解 (图略), 将水平平流作用分解为盐度异常相关部分和平流异常相关项, 进一步分析得到弱过程中水平平流负贡献的缺失主要由于这一阶段与平流异常相关部分的负作用的缺失, 而平流异常部分的作用可能最终仍与淡水通量以及与降水相关的大气过程有关。

从赤道中太平洋 Niño3.4 区 (图 9) 也可以得到类似的结论。Niño3.4 区滞后 Niño4 区变化, 表层强迫负作用对盐度趋势变化的影响更加显著。在强 El Niño 过程中, 表层强迫的作用从 El Niño 发

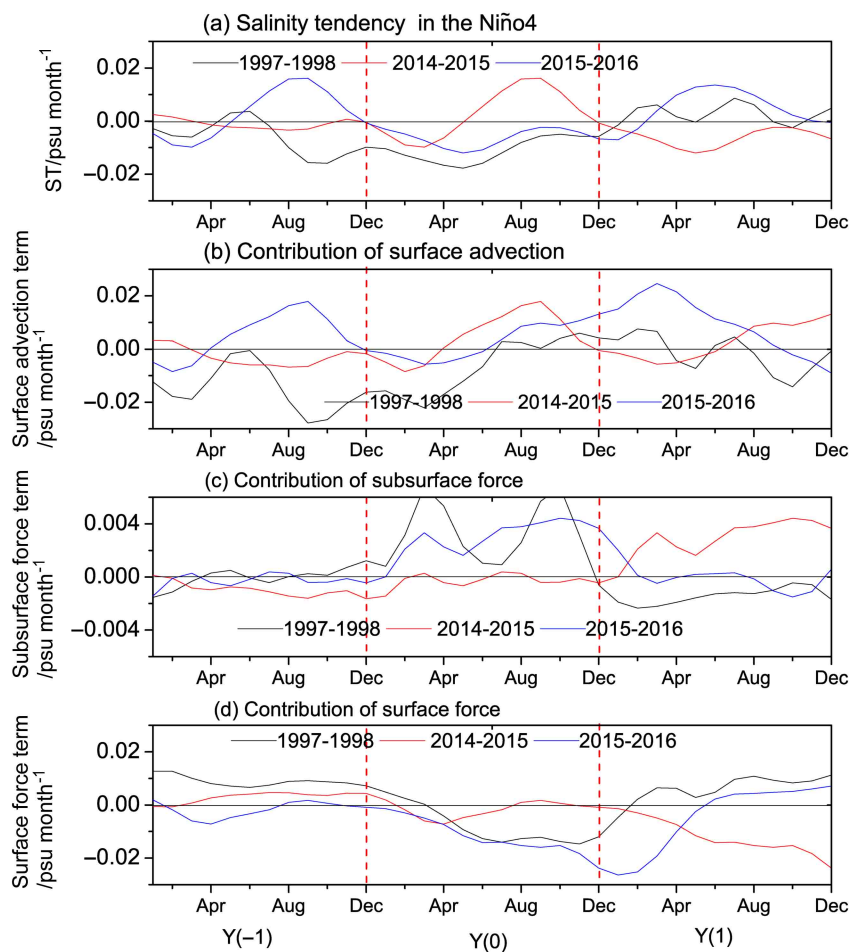


图8 1997/1998年(黑色线)、2014/2015年(红色线)、2015/2016年(蓝色线)三次El Niño期间Niño4区区域平均(a)混合层盐度趋势及其收支项贡献:(b)表层平流、(c)次表层强迫、(d)表层强迫。黑色水平横线为零线,红色虚线为年分界线

Fig. 8 (a) MLS tendency and contribution of MLS budget terms (b) surface advection, (c) subsurface force, and (d) surface force during El Niño events for 1997–1998 (black lines), 2014–2015 (red lines) and 2015–2016 (blue lines) averaged over the Niño4 region. The black line represents zero, and the red dashed lines separate the years

生年春季就开始显现,1997年和2016年3月表层强迫作用对盐度负趋势的影响几乎决定了盐度的变化情况。而在弱过程中,2014年春季,表层强迫负作用缺失,因此在2014年7月,盐度开始出现正变趋势,进而使SSSA对SSTA正反馈过程大大减弱。

因此,在El Niño前一年及发生前期,影响盐度变化的主要因子是表层平流,在一定程度上影响事件的发生。在El Niño当年春季,异常信号已经出现后,春夏季El Niño信号能否维持及继续发展则受到水平平流及表层强迫的共同影响,并且表层强迫作用更加重要。表层强迫的作用将影响El Niño发生后,在发生年的夏季,盐度负变化趋势是否维持,即El Niño是否继续发展。

6.2 ENSO期间导致SSSA原因

在热带太平洋,ENSO期间对表层盐度变化趋势起主要作用的表层强迫主要是由淡水通量引起的(Zheng and Zhang, 2012)。El Niño期间,FWF异常超前于盐度变化,推动暖而淡的水团向东输送,对应高盐水西流,在日界线形成盐度梯度强大的盐锋(Gasparin and Roemmich, 2016)。在El Niño前期,日界线附近的FWF负异常导致高盐水区的盐度迅速减小,调节海洋表层的密度变化,间接影响海水的垂向运动,使得MLD变小,BLT增加,进而调制SST。在温度还未响应ENSO变化的过程前期,降水作为FWF的直接来源,对盐度的变化产生直接作用。

三次过程中FWF异常(图10)与SSSA变化

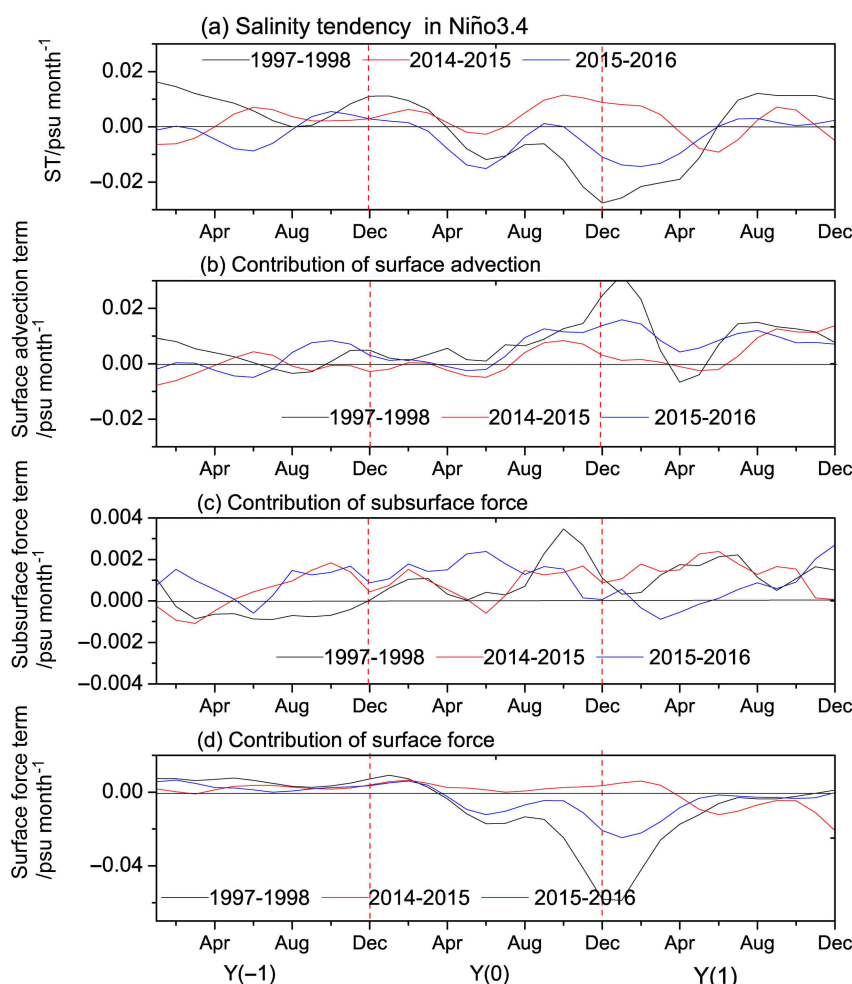


图9 同图8, 但为 Niño3.4 区域平均 (单位: psu month^{-1})

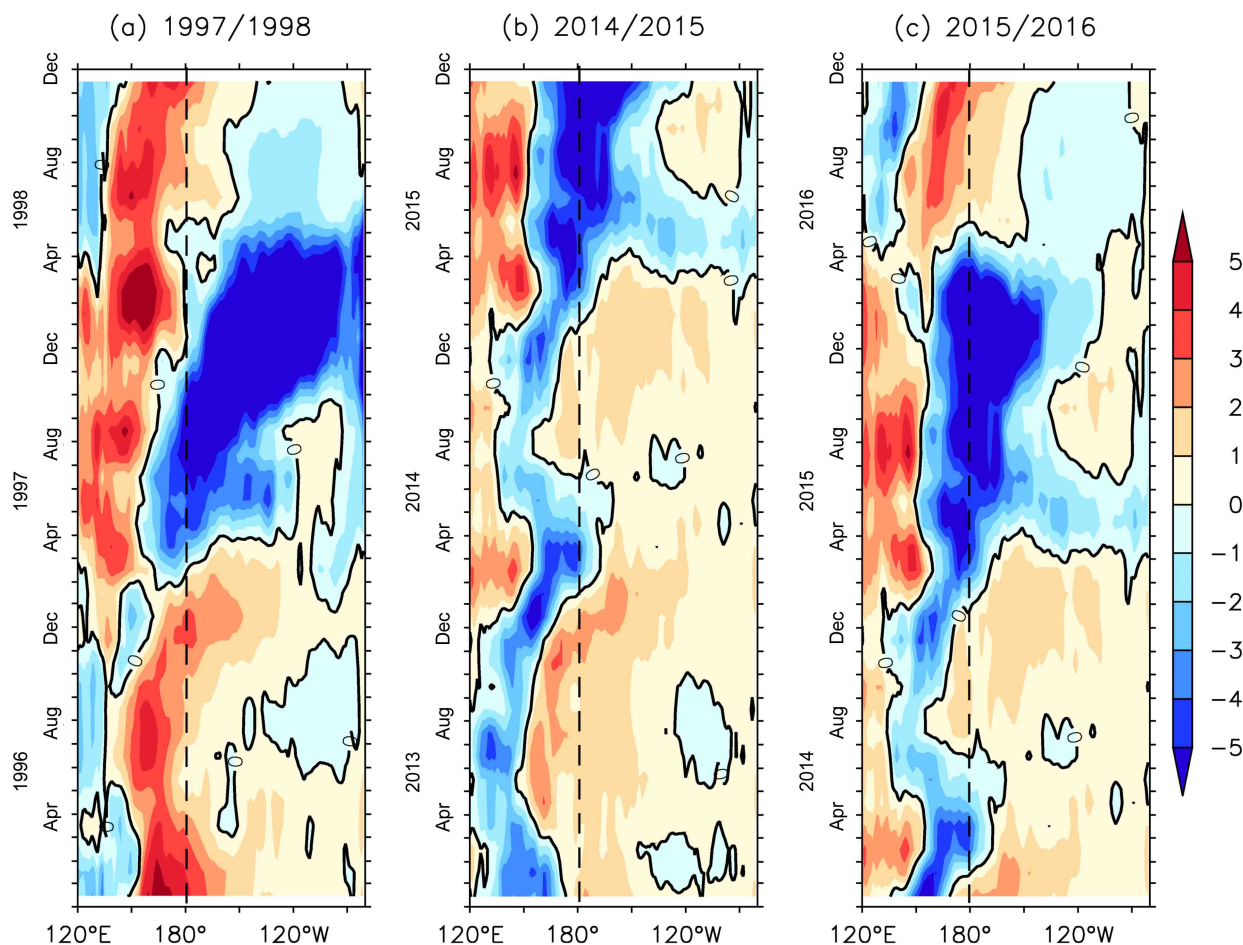
Fig. 9 As in Fig. 8, but for the means in Niño3.4 region (units: psu month^{-1})

(图2)的时空演变过程一致。在1997年、2013年和2014年整年,赤道西太平洋都存在显著的FWF负异常,从El Niño发生年初开始,西太平洋的FWF负异常向日变线方向东移。1997年3月FWF负异常东移至日变线位置并开始持续发展,比同一区域的SSSA变化超前1~2个月,2014年和2015年日变线附近的FWF负异常信号出现更早。FWF和SSSA虽然在演变上存在时滞,但两者的移动路径是相似的。在El Niño趋于结束时,FWF异常趋于平均态,但盐度没有相应增加,仍在之后的几个月内维持显著的盐度负异常。

相比较1997年和2015年FWF负异常持续发展东移,在2014年春季,FWF异常在日变线以西停滞并西传,使得对应区域负SSSA迅速减弱同时也出现西传,FWF的弱作用在2014年盐度变化中未能起到很大贡献。值得注意的是,1997年春季

盐度变化负趋势开始出现的时间早于FWF负异常,与1997年出现的显著水平平流作用(图8)有关,并与FWF一起调节盐度变化,而SSSA变化的滞后可能受当年出现的强次表层强迫作用影响。

盐度的变化还与向东洋流有关(图略)。三次事件中,1997/1998年El Niño向东流异常的发生与盐度负异常的作用非常显著,2015/2016年El Niño则超前盐度变化3个月左右。向东洋流在事件发生前不存在显著一致特征。在1997/1998年El Niño中,赤道太平洋日变线以西的海表纬向向东流有显著正异常,ENSO后期降水引起赤道西太平洋海表面高度升高,促使表层向东流携带热带西北太平洋的高盐水向东输送,与东太平洋携带低盐水的向西流在日变线附近汇合,形成显著的盐度梯度而引起盐度变化,其中极大值从El Niño年当年夏季持续到冬季。在2014年事件中,

图 10 同图 1, 但为淡水通量 (FWF) 异常 (单位: mm d^{-1})Fig. 10 As in Fig. 1, but for FWF (freshwater flux) anomalies (units: mm d^{-1})

赤道西太平洋表层的向东流异常不明显, 2~3 月在日变线附近出现了一次正异常后消失。2015 年重新受到激发, 这次过程的不同期变化可能与其异常高值仅出现在暖池西侧位置, 以及日变线以东的中太平洋的向东流异常不显著, 甚至存在向西流有关, 减慢了盐度变化的响应。

7 结论和讨论

2015/2016 年 El Niño 事件被认定为 1950 年以来峰值强度最大的事件 (Ren et al., 2017)。此次超强事件所展现出来的独特性和复杂性, 深刻影响了人们对于 ENSO 典型特征和发展机制的诸多固有认识。该事件早期信号开始于 2014 年初, 在经历了 2014 年年中和 2015 年年初的两次波折后, 最终于 2015 年底达到峰值成为一次超强事件。期间赤道太平洋 SSTA 东传明显, 但中心位置介于传统东部型和中部型之间, 事件持续时间漫长, 发展过

程却一波三折。各研究从不同的角度分析这次超强 El Niño 发生和发展的原因, 包括 2014/2016 年 El Niño 事件的发展演变过程、动力学机制、海洋次表层影响、春季预报障碍和海气耦合过程等。近年来, 人们研究气候变率的重点逐渐移至海洋物理场变化。盐度作为海洋的基本组成要素之一, 不仅可以作为全球水循环的指数, 而且参与海洋动力过程, 对海洋的 SST 有着调制作用。

本文通过比较近年三次特殊 El Niño 过程, 进一步验证了日变线附近盐度变化和 ENSO 的关系, 特别是盐度在强弱 El Niño 事件中的不同特征和影响。盐度对于 SSTA 的调制作用, 研究已有较明确的结论, 更重要的是, 影响海洋关键区域的 SSSA 变化不仅存在着前期信号, 而且其趋势也存在着超前 ENSO 的可能信号。对比三次 El Niño 事件中盐度的演变过程, 其中 1997/1998 年和 2015/2016 年为两次强事件, 盐度异常从持续时间和空间分布上

与海表面温度相吻合, 2014/2015 年为弱过程, 期间海温异常增暖的中止, 也对应了盐度异常负变停滞、负异常西退的过程, 表明盐度变化与 ENSO 发展有很好的对应关系, 再现了盐度影响 BLT, 调制海温影响 ENSO 的具体过程。对盐度收支进行分析, 发现水平平流和海洋表层强迫是影响盐度收支的主要因子, 在 El Niño 前一年及发生前期, 影响盐度变化的主要因子是表层平流, 负的表层平流作用使得盐度负趋势增大, 进而在日变线附近出现负 SSSA, 其在一定程度上影响了事件的发生。在 El Niño 当年春季, 异常信号已经出现后, 当年春夏季 El Niño 信号能否维持及继续发展则受到水平平流及表层强迫的共同影响, 并且表层强迫作用更加重要。表层强迫的作用将影响 El Niño 发生后, 在发生年的夏季, 盐度负趋势是否能够维持, 即 El Niño 是否继续发展。热带西太平洋前期 FWF 异常对三次 El Niño 事件的表层强迫作用的影响最为显著, 对盐度负趋势的维持起着决定性作用。相比较两次强 El Niño 事件, 2014/2015 年对应的早期的 FWF 负异常没有发展东移, FWF 的负异常的减弱, 使其不能维持负 SSSA, 抑制了中太平洋的早期变暖。中西太平洋的早期 SSS 及其变率可能可以作 SST 异常的指数, 特别地, SSSA 在调节海洋的 SSTA 时, 不仅影响它的强度, 而且可以作为判断 ENSO 是否继续发展及其强弱的前兆因子。

在本文研究中, 主要考虑三次事件的区别, 对于 2014/2015 年事件中盐度机制对后期 2015/2016 年事件发生和发展的潜在影响可能还需要定性研究。太平洋海域的盐度变化存在多个关键区域 (Delcroix et al., 2007), 本文在分析盐度对 ENSO 的影响时仅考虑赤道太平洋区域, 对其他区域盐度影响的研究有所欠缺, 这三次事件是否与赤道地区的盐度变化有最大相关我们并未进行探讨, 在之后的研究中我们可能考虑确定影响更为显著的区域, 来进一步确定其内在的影响机制。

本文主要探讨了水平平流和 FWF 对盐度的影响, 但影响水平平流及 FWF 异常的 El Niño 发生前期的降水来源和机制、海气耦合作用等需要被进一步研究和解释。虽然由于西风爆发和海气相互作用, 向东洋流可以影响盐度变化, 向东流异常的出现和维持与负 SSSA 有着良好的对应关系, 并且在 El Niño 发展后期作用相当显著 (刘伯奇等, 2015; Lian et al., 2017), 但是在 El Niño 前期, 其对不

同强弱事件中盐度变化的作用还未找到一致的特征, 对此目前还未找到一个具体清晰的机制来解释。因而在这三次事件中, 相比较 FWF, 向东流对盐度的作用大小并不能很好地反映出 ENSO 发展强弱的区别。

另外, 本文仅对比了近年观测历史上最强的两次 El Niño 事件过程和一次弱过程, 这三次事件都有一定的特殊性, 不论是发生时间还是强度都有别于普通的 El Niño 事件。因此, 盐度对 ENSO 事件的显著影响是否为个例有待探讨, 对于盐度对强弱 ENSO 的影响的还缺乏系统的研究。可以进一步对比历年经典的 ENSO 事件, 对其盐度的演变过程进行类似分析, 利用模式实验探究其普遍性, 进一步区分盐度在强弱 ENSO 事件中作用的差异。另外, 对于 ENSO 的异常和复杂性, 可能还需要从全球变暖和气候年代际的角度分析, 以后将盐度变化放在此类背景下研究, 可能会得出更多有益的结论。

参考文献 (References)

- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) [J]. *J. Hydrometeorol.*, 4(6): 1147–1167. doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2
- Barnston A G, Tippett M K, L'Heureux M L, et al. 2012. Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: Is our capability increasing? [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93(5): 631–651. doi:10.1175/BAMS-D-11-00111.1
- Bosc C, Delcroix T, Maes C. 2009. Barrier layer variability in the western Pacific warm pool from 2000 to 2007 [J]. *J. Geophys. Res.*, 114(C6): C06023. doi:10.1029/2008JC005187
- Boyer T P, Levitus S, Antonov J I, et al. 2005. Linear trends in salinity for the World Ocean, 1955–1998 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(1): L01604. doi:10.1029/2004GL021791
- Cane M A, Zebiak S E. 1985. A theory for El Niño and the Southern Oscillation [J]. *Science*, 228(4703): 1085–1087. doi:10.1126/science.228.4703.1085
- Carton J A, Giese B S. 2008. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(8): 2999–3017. doi:10.1175/2007mwr1978.1
- Chen L, Li T, Wang B, et al. 2017. Formation mechanism for 2015/16 super El Niño [J]. *Sci. Rep.*, 7(1): 2975. doi:10.1038/s41598-017-02926-3
- Corbett C M, Subrahmanyam B. 2016. Validation of satellite-derived salinity in the equatorial Pacific with specific emphasis on the 2014–15 ENSO event [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 13(12): 1979–1983. doi:10.1109/LGRS.2016.2619980

- Corbett C M, Subrahmanyam B, Giese B S. 2017. A comparison of sea surface salinity in the equatorial Pacific Ocean during the 1997–1998, 2012–2013, and 2014–2015 ENSO events [J]. *Climate Dyn.*, 49(9–10): 3513–3526. doi:10.1007/s00382-017-3527-y
- De Boyer Montégut C, Madec G, Fischer A S, et al. 2004. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology [J]. *J. Geophys. Res.*, 109(C12): C12003. doi:10.1029/2004JC002378
- Delcroix T, Cravatte S, McPhaden M J. 2007. Decadal variations and trends in tropical Pacific sea surface salinity since 1970 [J]. *J. Geophys. Res.*, 112(C3): C03012. doi:10.1029/2006JC003801
- Dong S F, Garzoli S L, Baringer M. 2009. An assessment of the seasonal mixed layer salinity budget in the Southern Ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 114(C12): C12001. doi:10.1029/2008JC005258
- Durack P J, Wijffels S E. 2010. Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming [J]. *J. Climate*, 23(16): 4342–4362. doi:10.1175/2010jcli3377.1
- Fedorov A V, Pacanowski R C, Philander S G, et al. 2004. The effect of salinity on the wind-driven circulation and the thermal structure of the upper ocean [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 34(9): 1949–1966. doi:10.1175/1520-0485(2004)034<1949:teosot>2.0.co;2
- Gao S, Qu T D, Nie X W. 2014. Mixed layer salinity budget in the tropical Pacific Ocean estimated by a global GCM [J]. *J. Geophys. Res.*, 119(12): 8255–8270. doi:10.1002/2014JC010336
- Gasparin F, Roemmich D. 2016. The strong freshwater anomaly during the onset of the 2015/2016 El Niño [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(12): 6452–6460. doi:10.1002/2016GL069542
- Hasson A E A, Delcroix T, Dussin R. 2013. An assessment of the mixed layer salinity budget in the tropical Pacific Ocean. Observations and modelling (1990–2009) [J]. *Ocean Dyn.*, 63(2–3): 179–194. doi:10.1007/s10236-013-0596-2
- Hu S N, Fedorov A V. 2016. Exceptionally strong easterly wind burst stalling El Niño of 2014 [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 113(8): 2005–2010. doi:10.1073/pnas.1514182113
- Huang B Y, Mehta V M. 2005. Response of the Pacific and Atlantic oceans to interannual variations in net atmospheric freshwater [J]. *J. Geophys. Res.*, 110(C8): C08008. doi:10.1029/2004JC002830
- Jacox M G, Hazen E L, Zaba K D, et al. 2016. Impacts of the 2015–2016 El Niño on the California current system: Early assessment and comparison to past events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(13): 7072–7080. doi:10.1002/2016GL069716
- Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E. 2000. An optimal definition for ocean mixed layer depth [J]. *J. Geophys. Res.*, 105(C7): 16803–16821. doi:10.1029/2000jc900072
- Latif M, Anderson D, Barnett T, et al. 1998. A review of the predictability and prediction of ENSO [J]. *J. Geophys. Res.*, 103(C7): 14375–14393. doi:10.1029/97jc03413
- Levine A F Z, McPhaden M J. 2016. How the July 2014 easterly wind burst gave the 2015–2016 El Niño a head start [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(12): 6503–6510. doi:10.1002/2016GL069204
- Lian T, Chen D K, Tang Y M. 2017. Genesis of the 2014–2016 El Niño events [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 60(9): 1589–1600. doi:10.1007/s11430-016-8315-5
- 刘伯奇, 李健颖, 毛江玉, 等. 2015. 2014 年赤道东太平洋 El Niño 事件发展以及停滞过程的成因 [J]. *科学通报*, 60(22): 2136–2148.
- Lukas R, Lindstrom E. 1991. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 96(S01): 3343–3357. doi:10.1029/90JC01951
- Maes C, Picaut J, Belamari S. 2002. Salinity barrier layer and onset of El Niño in a Pacific coupled model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(24): 2206. doi:10.1029/2002GL016029
- Maes C, Picaut J, Belamari S. 2005. Importance of the salinity barrier layer for the buildup of El Niño [J]. *J. Climate*, 18(1): 104–118. doi:10.1175/JCLI-3214.1
- Maes C, Ando K, Delcroix T, et al. 2006. Observed correlation of surface salinity, temperature and barrier layer at the eastern edge of the western Pacific warm pool [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(6): L06601. doi:10.1029/2005GL024772
- McPhaden M J. 2003. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(9): 1480. doi:10.1029/2003GL018672
- McPhaden M J. 2015. Playing hide and seek with El Niño [J]. *Nat. Climate Change*, 5(9): 791–795. doi:10.1038/nclimate2775
- McPhaden M J, Busalacchi A J, Cheney R, et al. 1998. The tropical ocean-global atmosphere observing system: A decade of progress [J]. *J. Geophys. Res.*, 103(C7): 14169–14240. doi:10.1029/97JC02906 @10.1002/(ISSN)2169-9291.TOGA1
- Miller A J, Angell J K, Korshover J. 1976. Tropical waves and the Quasi-Biennial Oscillation in the lower stratosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33(3): 430–435. doi:10.1175/1520-0469(1976)033<0430:TWATQB>2.0.CO;2
- Miller J R. 1976. The salinity effect in a mixed layer ocean model [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 6(1): 29–35. doi:10.1175/1520-0485(1976)006<0029:tseiam>2.0.co;2
- Min Q Y, Su J Z, Zhang R H, et al. 2015. What hindered the El Niño pattern in 2014? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42(16): 6762–6770. doi:10.1002/2015GL064899
- Mu M, Ren H L. 2017. Enlightenments from researches and predictions of 2014–2016 super El Niño event [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 60(9): 1569–1571. doi:10.1007/s11430-017-9094-5
- Ren H L, Wang R, Zhai P M, et al. 2017. Upper-ocean dynamical features and prediction of the super El Niño in 2015/16: A comparison with the cases in 1982/83 and 1997/98 [J]. *J. Meteor. Res.*, 31(2): 278–294. doi:10.1007/s13351-017-6194-3
- Santoso A, McPhaden M J, Cai W J. 2017. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño [J]. *Rev. Geophys.*, 55(4): 1079–1129. doi:10.1002/2017RG000560
- Sprintall J, Tomczak M. 1992. Evidence of the barrier layer in the surface layer of the tropics [J]. *J. Geophys. Res.*, 97(C5): 7305–7316. doi:10.1029/92JC00407
- Stramma L, Fischer T, Grundle D S, et al. 2016. Observed El Niño conditions in the eastern tropical Pacific in October 2015 [J]. *Ocean Sci.*, 12(4): 861–873. doi:10.5194/os-12-861-2016
- 王凡, 刘传玉, 胡石建, 等. 2018. 太平洋暖池冷舌交汇区盐度变异机

- 制及气候效应研究 [J]. *地球科学进展*, 33(8): 775–782. Wang Fan, Liu Chuanyu, Hu Shijian, et al. 2018. Variability and climate effect of the salinity in the Pacific warm pool-cold tongue confluence region [J]. *Advance in Earth Science*, 33(8): 775–782. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.08.0775
- Wang X D, Liu H L. 2016. Seasonal-to-interannual variability of the barrier layer in the western Pacific warm pool associated with ENSO [J]. *Climate Dyn.*, 47(1–2): 375–392. doi:10.1007/s00382-015-2842-4
- Xue Y, Kumar A. 2017. Evolution of the 2015/16 El Niño and historical perspective since 1979 [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 60(9): 1572–1588. doi:10.1007/s11430-016-0106-9
- Yeh S W, Kug J S, An S I. 2014. Recent progress on two types of El Niño: Observations, dynamics, and future changes [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1): 69–81. doi:10.1007/s13143-014-0028-3
- Yu L S, Jin X Z, Weller R A. 2008. Multidecade global flux datasets from the Objectively Analyzed Air–sea Fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables [R]. OAFlux Project Tech. Rep. OA-2008-01.
- 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 [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 60(9): 1601–1613. doi:10.1007/s11430-016-0201-9
- Zhang R H, Busalacchi A J, Murtugudde R G, et al. 2006. An empirical parameterization for the salinity of subsurface water entrained into the ocean mixed layer (S_e) in the tropical Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(2): L02605. doi:10.1029/2005GL024218
- Zhang R H, Wang G H, Chen D K, et al. 2010. Interannual biases induced by freshwater flux and coupled feedback in the tropical Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138(5): 1715–1737. doi:10.1175/2009mwr3054.1
- Zheng F, Zhang R H. 2012. Effects of interannual salinity variability and freshwater flux forcing on the development of the 2007/08 La Niña event diagnosed from Argo and satellite data [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 57: 45–57. doi:10.1016/j.dynatmoce.2012.06.002
- Zheng F, Zhang R H. 2015. Interannually varying salinity effects on ENSO in the tropical Pacific: A diagnostic analysis from Argo [J]. *Ocean Dyn.*, 65(5): 691–705. doi:10.1007/s10236-015-0829-7
- Zhi H, Zhang R H, Lin P F, et al. 2015. Quantitative analysis of the feedback induced by the freshwater flux in the tropical Pacific using CMIP5 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(10): 1341–1353. doi:10.1007/s00376-015-5064-0
- Zhi H, Zhang R H, Zheng F, et al. 2016. Assessment of interannual sea surface salinity variability and its effects on the barrier layer in the equatorial Pacific using BNU-ESM [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(3): 339–351. doi:10.1007/s00376-015-5163-y
- Zhi H, Zhang R H, Lin P F, et al. 2019. Interannual salinity variability in the tropical Pacific in CMIP5 simulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 36(4): 378–396. doi:10.1007/s00376-018-7309-1
- Zhu J S, Huang B H, Zhang R H, et al. 2014. Salinity anomaly as a trigger for ENSO events [J]. *Sci. Rep.*, 4: 6821. doi:10.1038/srep06821
- Zhu J S, Kumar A, Huang B H, et al. 2016. The role of off-equatorial surface temperature anomalies in the 2014 El Niño prediction [J]. *Sci. Rep.*, 6: 19677. doi:10.1038/srep19677