

## 我国热带海气相互作用与 ENSO 动力学及预测研究进展\*

任宏利<sup>1</sup> 郑飞<sup>2</sup> 罗京佳<sup>3</sup> 王润<sup>1,4</sup> 刘明竑<sup>1,4</sup> 张文君<sup>3</sup> 周天军<sup>2</sup> 周广庆<sup>2</sup>

REN Hongli<sup>1</sup> ZHENG Fei<sup>2</sup> LUO Jingjia<sup>3</sup> WANG Run<sup>1,4</sup> LIU Minghong<sup>1,4</sup> ZHANG Wenjun<sup>3</sup> ZHOU

Tianjun<sup>2</sup> ZHOU Guangqing<sup>2</sup>

1 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 南京信息工程大学, 南京 210044

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

1 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

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

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2019-09-11 收稿

任宏利, 郑飞, 罗京佳, 王润, 刘明竑, 张文君, 周天军, 周广庆. 2019. 我国热带海气相互作用与 ENSO 动力学及预测研究进展. 气象学报,

Ren Hongli, Zheng Fei, Luo Jingjia, Wang Run, Liu Minghong, Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Zhou Guangqing. 2019. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics and prediction in China. *Acta Meteorologica Sinica*,

**Abstract** Remarkable progress has been made in observations, theories and simulations of the ocean-atmosphere system, laying a solid foundation for the improvement of short-term climate predictions, among which Chinese scholars made important contributions. This paper reviews Chinese research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics and prediction in the past 70 years. The tropical air-sea interaction part mainly focuses on four aspects: the characteristics of the tropical Pacific climate system and ENSO phenomenon; the main modes of tropical Indian Ocean SSTs and their interactions with the tropical Pacific; the main modes of tropical Atlantic SSTs and inter-basin interactions; and the influence of the mid-high-latitude air-sea system on ENSO. The ENSO dynamics part involves seven aspects: fundamental

\* 资助课题: 国家重点研发计划重点专项项目 (2018YFC1506000)、国家自然科学基金项目 (41975094, 41275073)。  
作者简介 任宏利, 主要从事气候动力学与短期气候预测研究。E-mail: [renhl@cma.gov.cn](mailto:renhl@cma.gov.cn)

---

theories of ENSO; diagnosis and simulations of ENSO; the two types of ENSO; the mechanisms of ENSO initiation; the interactions between ENSO and other phenomena; external forcings and teleconnections; and climate change and the ENSO response. The ENSO prediction part briefly summarizes the dynamical - statistical methods of ENSO prediction, as well as ENSO prediction systems and their applications. Lastly, we discuss some of the issues in these areas that are in need of further study.

**Key words** Tropical air-sea interaction, El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Dynamics, Prediction

**摘 要** 国际上针对海洋-大气系统的观测、理论和模拟方面已经开展了广泛而深入的研究工作,为短期气候预测水平的不断提升奠定了坚实基础,这其中我国学者做出了重要贡献。**[目的]** 本文简要回顾了我国学者 70 年来在热带海气相互作用与 ENSO 动力学及预测方面的研究进展情况。其中,热带海气相互作用部分主要涉及 4 个方面的内容:热带太平洋气候特征与 ENSO 现象、热带印度洋海温主要模态及其与太平洋相互作用、热带大西洋海温主要模态及海盆间相互作用、中高纬海气系统对 ENSO 的影响; ENSO 动力学包括 7 个方面的内容:基本理论的相关研究、ENSO 相关的诊断与模拟研究、两类 ENSO 相关研究、ENSO 触发机制相关研究、ENSO 与其他现象的相互作用、外部强迫与大气遥相关、气候变化与 ENSO 响应; ENSO 预测主要包含 2 个方面的内容:动力-统计 ENSO 预测方法、ENSO 预测系统与应用。最后,本文讨论了上述相关方面后续亟待解决的问题。

**关键词:** 热带海气相互作用,厄尔尼诺与南方涛动,动力学,预测

中图法分类号 XXX

## 1 引言

大气是气候系统中最活跃分量,与人类活动的联系最为密切,而海洋也是气候系统的重要组成部分,覆盖了地球 71% 的表面积,并吸收了进入地球大气层顶的总太阳辐射量的 70% 左右。海洋主要依靠与大气之间的相互作用影响气候的变化,通过感热、潜热以及长波辐射等热力作用驱动大气,而大气除了通过热和水分通量等之外,还主要通过风应力将动量输送给海洋,以动力作用影响海流。大气运动往往具有高频、快速的特点,而海洋由于具有极大的惯性,其运动和变化也比较缓慢。通过海气相互作用,海洋可以调制气候系统中的高频变率并对较低频的信号有记忆作用。与之相关联,全球存在几个重要的以海洋-大气耦合为主导的年际低频模态,如厄尔尼诺与南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO), 印度洋海盆模态 (Indian Ocean Basin-wide Mode, IOBM), 印度洋偶极子模态 (Indian Ocean Dipole Mode, IOD), 大西洋尼诺等。其中强度最强、对全球气候系统影响也最大的即是 ENSO。

ENSO 现象是厄尔尼诺和南方涛动二者的合称,其中厄尔尼诺是指热带中东太平洋地区每隔 2-7 年发生的海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 异常偏高的现象,并对应赤道太平洋温跃层倾斜程度减弱和异常的大气环流。反之, SST 异常偏低的现象被称为拉尼娜。厄尔尼诺和拉尼娜分别对应 ENSO 的暖位相和冷位相,二者经常交替出现。当厄尔尼诺或拉尼娜发生时,常常会伴随年际尺度上的热带东、西太平洋大气质量的反位相振荡也即南

---

方涛动。厄尔尼诺和南方涛动实际上是 ENSO 现象在海洋和大气中的不同表现形式。**[研究的意义]** ENSO 作为热带海气相互作用的最主要模态，已成为目前短期气候预测的重要物理基础。

随着近几十年来对热带特别是热带太平洋地区的海洋大气观测资料日益丰富以及气候模式模拟能力的提升，国际学界对海气相互作用以及 ENSO 现象的认识也在不断提高，我国学者也广泛参与其中并做出了重要贡献。**[本研究切入点]** 本文将从热带海气相互作用与 ENSO 动力学及预测三个紧密联系的方面简要回顾新中国成立以来我国学者所取得的主要研究成果，并就一些后续亟待解决的科学问题简单进行讨论。

## 2 热带海气相互作用

### 2.1 热带太平洋气候特征与 ENSO 现象

热带太平洋地区的低层大气常年盛行信风东风，北半球为东北信风，南半球为东南信风，而南北半球信风交汇形成的热带辐合带（Intertropical Convergence Zone, ITCZ）则常年位于赤道以北地区。在东风作用下，赤道太平洋表层以西向洋流为主，赤道暖水向西堆积，东边界沿岸区域冷水上翻，同时在赤道两侧经向埃克曼运输的作用下赤道表层暖水向两极方向辐散，带动次表层冷水的上升运动，最终使得赤道太平洋的海洋温跃层呈西深东浅的倾斜结构，对应 SST 是西暖东冷。热带西太平洋以及东印度洋汇聚了大量暖水，其中平均 SST 超过 28°C 的区域被称作印度洋-西太平洋暖池区，而赤道东太平洋则形成了南北狭窄的 SST 冷舌区。暖池区上方的大气受海温加热，因此对流活动旺盛、上升运动强烈，而热带东太平洋由于海水温度偏低，其上的大气温度偏冷，盛行下沉运动，同时低层大气盛行东风，高空的大气风向则相反，恰好构成了一个闭合环路，这种热带地区特有的大气纬圈环流现象也被称为沃克环流。

ENSO 现象的发展维持与热带太平洋的气候背景态密切相关，其最重要的机制便是著名的 Bjerknes 正反馈机制，即由 Bjerknes (1969) 首先提出并由后人补充完善的纬向风、纬向温度梯度及赤道温跃层倾斜之间相互作用的正反馈机制，并且 Bjerknes 正反馈机制与 ENSO 的增长也密切相关：当赤道东太平洋由于某种原因出现正的 SST 异常扰动时，会减弱东西向 SST 梯度，并使其上方大气的下沉运动减弱，沃克环流和赤道东风也减弱。而赤道东风的减弱使得海洋上翻流减弱，导致赤道东太平洋温跃层加深，而东太平洋 SST 进一步升高。通过赤道太平洋地区的海气相互作用，正的初始海温小扰动最终发展成为一次 ENSO 暖事件，反之则形成 ENSO 冷事件。ENSO 发展的基础在于赤道太平洋气候平均态的不稳定性，通过海气相互作用的 Bjerknes 正反馈机制使得 SST 异常的小扰动不断发展最终形成海盆尺度的气候异常现象。现实中的海温异常不可能维持无限制增长，由于大气和海洋负反馈过程以及非线性阻尼过程影响，海温异常在增长到一定程度后就会回落。

我国学者结合观测与数值试验针对 ENSO 与背景气候态的联系也做了大量研究。20 世纪

---

70 年代之后厄尔尼诺事件变得更强, ENSO 循环的振荡加强, 冷暖位相的不对称性也更加明显 (张勤等, 2001; Ren, et al, 2013b)。受 ENSO 活跃性增强的影响, Hadley 环流也有明显变化, 其对 ENSO 的响应也明显增强 (Guo, et al, 2018)。这些现象可能是由于热带太平洋的大气和海洋均由 70 年代末之前的较冷态转为之后的较暖态使得热带太平洋地区海气耦合加强导致的 (张勤等, 2001)。同样地, 发生在 2000 年前后的 ENSO 属性 (包括空间模态、振幅以及频率等) 年代际转型也可能与热带太平洋气候背景态由偏厄尔尼诺形态转为偏拉尼娜形态有关 (Xie, et al, 2015; Wang R, et al, 2017)。此外, 容新尧等 (2003) 利用全球海-气耦合环流模式的数值试验以及 Li 等 (2011) 利用过去 1100 年的气候重建数据, 分析证实了 ENSO 的振幅和频率等属性与热带太平洋的背景态变化显著相关。热带太平洋年代际及更长时间尺度背景态的改变显著影响了海气动力过程并可能使 ENSO 属性发生改变 (陈永利等, 2005; Xie, et al, 2015; Zhong, et al, 2017)。当然, ENSO 与背景态相互作用的关系是复杂的, ENSO 事件的存在也可能反过来影响了热带太平洋背景态的表现 (Liang, et al, 2012; Hua, et al, 2015)。

ENSO 与赤道外热带太平洋的海洋大气系统也有着紧密联系。不同振幅或空间模态的 ENSO 事件对应着不同的 ITCZ 变化 (Xie, et al, 2014; Xie S-P, et al, 2018), ENSO 的发展和衰减阶段对应着不同的西北太平洋降水-SST 相关关系 (Wu et al. 2009); 由赤道、东边界、赤道外南北两侧 ( $10^{\circ}$  N 和  $10^{\circ}$  S) 以及西边界所构成的温跃层冷暖信号传播环路是 ENSO 循环的重要组成部分 (陈锦年等, 2003; 于卫东等, 2003; 孟祥凤等, 2004; 乔方利等, 2004; 王宏娜等, 2012)。我国学者还开创性地提出了东亚冬季风与 ENSO 的相互作用理论, 即东亚冬季风异常通过引起热带西太平洋暖池次表层海温异常进而对 ENSO 事件的发生有重要作用, 随后 ENSO 次表层海温异常信号沿环路在赤道外西传反过来影响东亚冬季风活动 (周广庆等, 1999; 穆明权等, 2000; 李崇银等, 2002)。

## 2.2 热带印度洋海温主要模态及其与太平洋相互作用

热带印度洋海温年际异常变率主要存在两个模态, 即 IOBM 和 IOD。前者表现为整个热带印度洋海盆的增暖或者变冷, 通常出现在北半球冬半年。后者表现为赤道印度洋海温东西相反的异常分布, 其正位相对应着赤道西印度洋偏暖、东南印度洋偏冷。IOD 通常发展于春夏季、成熟在秋季、随后在冬季迅速消亡并转变为 IOBM。热带印度洋的海温异常变化对亚洲季风活动及东亚地区气候变异有着重要影响, 我国科学家对印度洋海温异常特征的关注由来已久, 对其与 ENSO 的关系也做出了一系列研究。在国际上由赤道印度洋 SST 异常定义偶极子概念之后, 巢纪平等 (2003b) 进一步指出, 实际上多数年份热带印度洋 SST 距平经常表现为东西同符号只是强弱不同; 真正热带印度洋东西反向偶极子模态更多体现在次表层海温距平上, 并且大气场中纬向异常环流也表现出与次表层相匹配的异常上升与下沉, 从而呈现出与热带太平洋 ENSO 相类似的大尺度海气相互作用模态 (巢纪平等 2003a, 2003b, 2004,



---

2005)。Lu 等 (2018b, 2018c) 研究显示气候模式对 IOBM 的模拟和预测性能明显优于 IOD, 前者主要受 ENSO 影响, 而后的极端事件与印度洋温跃层反馈和风-蒸发-海表面温度反馈关系密切。

关于 IOD 模态的独立性及其与 ENSO 相互关系的问题, 一直以来存在许多争议。我国科学家很早就注意到, 印度洋与赤道东太平洋 SST 的年际变化存在显著的正相关关系 (Ji, et al, 1987; 吴国雄等, 1995)。吴国雄等 (1998) 借助于“齿轮”耦合转动来形象地描述赤道印度洋与太平洋上空异常纬向环流相互影响并致使 SST 响应的过程, 从而解释了这种正相关关系的成因, 并由此指出印度洋纬向风异常对 ENSO 事件的潜在触发机制 (孟文等, 2000; 邓北胜等, 2010)。IOD 概念提出后, 李崇银等 (2001) 通过对近百年观测资料的分析指出, 赤道印度洋与太平洋的海温偶极子 (类似 ENSO) 之间总体而言有很好的负相关关系, 并且赤道印度洋海温距平从偶极到单极的演变与厄尔尼诺从发展到衰减的演变过程对应良好 (谭言科 2004)。通过对比赤道东太平洋和印度洋的次表层海温距平模态, 也发现前者存在明显的超前于后者的关系, 二者通过两个大洋上空的反向沃克环流联系在一起 (巢清尘等, 2001; 巢纪平等, 2005; Qian, et al, 2005; 蔡怡等, 2008)。Yu 等 (2005) 则通过统计手段对 IOD 和 ENSO 各自相关的大气变率进行分离比对, 指出两者的范围包括对应的异常海洋响应位置均略有差异, 这在一定程度上说明 ENSO 在印度洋的海温响应与 IOD 本身并不完全一致。Luo 等 (2010) 基于数值试验发现 IOD 和 ENSO 之间存在较强的相互影响, 尤其是强的正 IOD 事件对中太平洋型 ENSO 的发展贡献显著。Zhang 等 (2015b) 指出厄尔尼诺不同类型纬向位置变异改变了其与 IOD 的联系。袁媛等 (2008) 探讨了 IOD 与 ENSO 之间关系的年代际变化, 指出在 1970 年之前, IOD 的相对独立性较好; 而在 1970 年之后 IOD 与 ENSO 的相关关系增强, 这可能与 1970 年之后海洋性大陆区域局地对流活动增强导致沃克环流增强有关。Luo 等 (2012) 发现印度洋海温的持续增暖有助于在太平洋出现类似拉尼娜的年代际变化, 从而影响 ENSO 以及全球变暖速率。此外, 王东晓等 (2003) 在分析 1997/98 年厄尔尼诺期间暖池周边海洋上层热含量变化时, 指出除了两个大洋上空的反向沃克环流异常的耦合关系, 印尼贯穿流对两个大洋海温的沟通也起着重要的作用。总体而言, 热带印度洋与热带太平洋之间存在显著的大尺度海气相互作用, 两个海洋的反向梯度关系受到大气及海洋环流的耦合调制并表现出一定正反馈关系。基于此, 连涛等 (2014) 提出热带西印度洋-暖池-热带东太平洋的印太三极子振荡模态概念, 从海盆相互作用层面理解热带地区的气候变率及其影响。

### 2.3 热带大西洋海温主要模态及海盆间相互作用

热带大西洋海温异常主模态包括位于赤道大西洋上与 ENSO 类似的偶极型海温异常, 即大西洋尼诺, 受 ENSO 影响较大; 位于热带大西洋北部的海温异常, 这一关键区域的海温异常可能与太平洋-北美型以及北大西洋涛动关系密切。许多研究表明, 前期热带大西洋海温异常可以通过影响热带及中高纬地区的大气环流, 直接或间接地引起热带太平洋出现海温异

---

常, 并且不同海区温度异常在热带太平洋的响应位置也有所差异(宋家喜, 1987; Wu, et al, 2007; Wang, et al, 2010; Wu, et al, 2012; Ding, et al, 2017b; Wang L, et al, 2017; Nie, et al, 2019; Zhang, et al, 2019), 增加了 ENSO 特征的复杂性。Wang L 等 (2017) 指出热带大西洋可能存在一种跨海盆的“电容器”效应, 可存储赤道太平洋海温异常信号、并经由副热带的遥相关机制在次年重新释放到热带太平洋, 从而对 ENSO 的准两年周期进行调制。Luo 等 (2017) 和 Zhang 等 (2019) 发现热带大西洋海温异常强迫可能有助于连续型拉尼娜事件的出现。而且, 热带大西洋与太平洋相互作用关系存在着年代际变化, 大约在 20 世纪 80 年代之后热带大西洋对太平洋的影响明显增强, 这可能与热带大西洋气候态的长期变化趋势有关 (Chen S-F, et al, 2017)。Jia 等 (2019) 研究表明受到全球变暖背景的影响, ENSO 对于赤道大西洋海温异常的响应有所减弱。此外, 我国学者基于热带太平洋、印度洋和大西洋海气模态相互之间都存在一定影响的认识, 指出建立泛赤道海盆间相互作用概念的重要性, 并据此就全球气候预测和人类活动造成的气候变化等问题展开讨论 (刘秦玉等, 2009; Cai, et al, 2019; Wang C, 2019)。

#### 2.4 中高纬海气系统对 ENSO 的影响

越来越多研究表明中高纬海气系统与 ENSO 之间也存在相互影响, 我国学者对此也做了大量研究。北太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 与 ENSO 在年际以及年代际尺度上有较好相关性 (He, et al, 2005; Wang, et al, 2009)。一方面, PDO 正位相有利于厄尔尼诺事件的发生, 负位相则较有利于拉尼娜的发生, 另一方面, 在 PDO 正位相背景下厄尔尼诺的振幅比 PDO 负位相时明显更强, 而模式对前者模拟较好但对后者缺乏模拟能力 (Lin, et al, 2018)。除了 PDO 以外, 北太平洋 SST 异常的第二模态 (被称为维多利亚模态, Victoria Mode, VM) 主要受到北太平洋振荡 (North Pacific Oscillation, NPO) 控制, 其通过影响表层海气耦合、赤道次表层海温以及 ITCZ 与 SST 异常的热力学耦合过程来影响 ENSO 事件的发生, 它可能是 ENSO 事件的前期信号之一 (Ding, et al, 2015b, 2015c)。Xie 等 (2016) 发现北极平流层臭氧活动可以通过影响 NPO、进而影响 VM、并最终影响到 ENSO。另外, 北太平洋大气环流异常变化可在副热带东北太平洋产生 SST 异常、通过季节性脚印机制维持并传播至赤道中太平洋、从而触发中部型厄尔尼诺事件 (Xie, et al, 2013; Xu, et al, 2019)。北太平洋副热带高压与赤道东部海温相互影响 (陈烈庭, 1982), 并且与 ENSO 之间可能存在选择性相互作用, 前者在一定条件下可以触发随后的 ENSO 事件发生发展, 在 ENSO 发展成熟后又能反过来影响副高 (李熠等, 2010)。南半球热带外地区的大气变率可以单独或者与北半球大气变率共同影响 ENSO 事件的发生及其强度等 (Ding, et al, 2015a, 2017a)。南半球环状模 (Southern Hemisphere Annular Mode, SAM) 作为南半球热带外大气环流主模态, 可能会影响 ENSO 在衰减期的振幅 (Zheng, et al, 2017)。另外, 南北太平洋经向模态则分别有利于东、中太平洋 SST 异常的发展进而影响 ENSO 事件的空间型 (Ma,

---

et al, 2017; Min, et al, 2017)。

### 3 ENSO 动力学

ENSO 是一种准周期的振荡现象，基于海气耦合的 Bjerknes 正反馈机制能够解释 ENSO 的增长机制，其后的诸多相关研究也都予以了证实。早期 Wyrski (1975) 提出的关于厄尔尼诺发生发展的理论模型，强调了信风形成的能量积累作用，当信风减弱时，使得海洋位能得以释放，暖水回流，并以赤道开尔文波的形式东传最终形成厄尔尼诺事件。随后，Gill (1980) 将热带大气环流响应下垫面加热的过程解释为受热源驱动的大气开尔文波和罗斯贝波引起的运动。在此基础上，Zebiak 等 (1987) 提出的 Zebiak-Cane 模式成功模拟出 ENSO 期间整个赤道太平洋温跃层及海温的振荡变化，随后被大量用于 ENSO 的研究。

在 ENSO 循环中，必然存在负反馈机制使得 ENSO 在冷暖位相之间转换。目前，国际上存在着多种理论以解释 ENSO 位相转换 (Wang C, 2018)，其中被学术界普遍接受的理论主要有延迟振子模型 (Suarez, et al, 1988; Battisti, et al, 1989) 和充电振子模型 (Jin, 1997a, 1997b)。延迟振子理论模型描述的主要机制在于，厄尔尼诺期间与东太平洋海温升高相伴随的中心位于中太平洋异常西风会在赤道中东太平洋形成暖的开尔文波(导致海平面升高)、而在西太平洋赤道外两侧区域形成冷的罗斯贝波(导致海平面降低)。前者将减弱赤道东太平洋的冷水上翻使得暖事件出现，而后者到达大洋西边界后反射，产生了东传的冷开尔文波，到达大洋东部，推动 ENSO 向冷位相转换。延迟振子模型在观测中所面临的主要挑战在于西边界波动的反射效率不足和赤道波动传播速度过快的问题。充电振子理论认为赤道地区海洋上层热容量的经向输送是导致海气系统振荡的主要原因，即赤道海水热容量的“充电”和“放电”过程主导了 ENSO 循环，其优点在于不需要考虑西边界的反射。当 ENSO 暖位相在中东太平洋发展起来以后，东高西低的温跃层异常结构将驱动赤道热量输送到赤道外(即“放电”过程)，使得整个暖事件过程中形成赤道外区域的热量累积，当该过程达到一定程度后，温跃层变为纬向均匀负异常分布，此时海温和西风异常消失，东太平洋冷位相开始发展，ENSO 实现位相转换。当 ENSO 冷位相成长起来以后，相反的热量向赤道汇聚的过程启动，并推动 ENSO 位相周而复始的转换，整个“充放电”过程使得海气耦合系统产生年际尺度的振荡现象。

#### 3.1 基本理论的相关研究

自 Bjerknes 提出 ENSO 现象是热带地区的大尺度海气相互作用的产物之后，各种海气动力学理论和数值模型相继提出，用以解释 ENSO 现象的内在机理，特别是上世纪 80 年代以来，我国科学家针对大尺度海气相互作用动力学开展过大量的研究，对其中的海气不稳定耦合机理阐述非常深刻 (巢纪平, 1993)。80 年代初，通过线性改变海气耦合模型中的不同参数条件，季劲钧等 (1979) 和朱抱真等 (1981) 就指出在特定情况下，海温异常中的动力不稳定

扰动可以导致月际、年际尺度的低频振荡出现；金飞飞等（1988a, 1988b）进一步通过截谱简化的方式，将海气耦合动力过程非线性化，并通过定性解析和数值求解的方式分析了系统的稳定态和极限环解，在一定程度上对海气系统环流异常长期特征进行解释。具体到 ENSO 现象，诸多研究表明海气耦合不稳定在 ENSO 的发生、发展和传播特征中扮演着重要作用。80 年代末，缪锦海等（1989）在热带海洋大气波动及其相互作用的研究中讨论了一种因高背景海温作用产生的类开尔文波的甚低频强不稳定波动，这一海气耦合不稳定理论能够对 1982-1983 强厄尔尼诺事件的发生、发展过程做出较好的解释。而且，我国学者通过滤除大气和海洋中的高频波动后仅保留西传的罗斯贝波，发现在一定海温背景条件下，海气耦合的罗斯贝波除了西传外，仍可以产生一个不稳定的、类似罗斯贝波的耦合东传慢波（Chao, et al, 1988; 巢纪平等, 1990; Ji, et al, 1990; Zhang, et al, 1992）。进一步分析表明相比开尔文波，耦合东传慢波在解释 ENSO 事件某些传播和发展特征时可能更为重要，其产生也主要受海洋低频过程制约，因此强调了海洋罗斯贝波在热带低频海气耦合系统及 ENSO 中扮演的重要角色（巢纪平等, 1993; Zhang, et al, 1993; 张人禾等, 1994）。在上述工作基础上，张人禾（1995）和杨修群等（1995）系统性分析了热带海气耦合系统中各类波动的产生条件与不稳定性，进一步讨论了不同性质波动相互作用的动力学特征。这些工作为理解热带海气相互作用以及 ENSO 发生、发展机理提供了重要的理论参考。

### 3.2 ENSO 相关的诊断与模拟研究

除了海气耦合波动，关于 ENSO 的维持和位相转换机制，我国学者还从其他诸如海洋输送等物理角度给出了一些可能的解释。巢纪平（2002）和 Chao 等（2002）在海洋次表层中描述了一条异常海温信号传播的三维闭合环路以阐述 ENSO 循环过程。以暖池次表层海温异常为主体，海温异常信号先是沿海温最大距平曲面向东并向表层传播至东太平洋形成 ENSO 事件，然后异常信号沿东边界向北，再沿  $10^{\circ}$  N 西传，最后到达西太平洋并向南回到暖池完成环路循环，整个过程大约需要 2-4 年。赵永平等（2007）提出 ENSO 循环可以看成是由信风异常和海气耦合共同作用产生的、在赤道与  $12^{\circ}$  N 之间的热带太平洋混合层水体逆时针惯性振荡。Chen 等（2016）指出海盆尺度的温跃层纬向输运异常在 ENSO 峰值前后存在从东向到西向的突然反转，造成纬向平流反馈作用的逆转，并减小赤道温跃层的纬向倾斜，从而抑制正反馈过程、贡献于 ENSO 事件的快速衰减。在热带太平洋西边界，暖水水平输运在 ENSO 循环中扮演着重要角色，调制着 ENSO 相关的赤道太平洋地区暖水体积变化（Lu, et al, 2017）。另外，Duan 等（2013）利用条件非线性最优扰动方法研究了非线性温度平流与年循环的相互作用可以使得厄尔尼诺的年末锁相。盐度场也是季节到年际时间尺度海洋演变的重要影响因素，其年际变化显著影响了热带太平洋中西部海水密度和混合层、进而影响到海温场以及 ENSO 的发展（Zheng, et al, 2015a）。关于 ENSO 的周期性特征，Lu 等（2016）发现积云对流的改变对其有显著影响，Lu 等（2018a）则基于“充放电”振子理论框架，发展了可以定



---

量化的评估再分析资料与模式模拟中 ENSO 的主周期性的耦合动力指数, 即 Wyrski 指数。

ENSO 正负位相在振幅和持续时间上存在显著的不对称性。Zhang W 等 (2009) 指出 ENSO 正负位相在经向尺度的不对称是由于信风的强度差异导致的。Su 等 (2010) 诊断分析了混合层热收支方程中的非线性纬向、经向和垂直温度平流项对 ENSO 振幅不对称性的贡献, 发现纬向和经向温度平流项是造成赤道东太平洋正偏度的主要原因, 而非线性垂直平流起了相反作用。Chen 等 (2014) 发现厄尔尼诺与拉尼娜在持续时间上的不对称性主要来自于二者长事件的不对称, 厄尔尼诺的长事件在次年的冬天消亡, 而拉尼娜的长事件在西风异常扩展到日界线以西的影响下次年冬天会再次加强。当前 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5) 模式对 ENSO 的特征及相关动力学反馈的模拟存在显著差别 (例如, Chen, et al, 2013; Chen L, et al, 2015)。Liang 等 (2017) 通过简单模式分析发现 ENSO 振幅不对称性与强暖事件的脉冲式振荡模态有关。

### 3.3 两类 ENSO 相关研究

近年来, ENSO 时空复杂性已成为国内外研究热点, 通常把厄尔尼诺事件划分为两种类型: 即成熟期 SST 异常中心位于赤道东太平洋的东部 (EP) 型厄尔尼诺和位于赤道中太平洋的中部 (CP) 型厄尔尼诺, 它们不仅有明显不同的海气特征, 其对全球特别是东亚气候的影响也有较大差别 (例如, Weng, et al, 2007; Kao, et al, 2009; Kug, et al, 2009; Ren, et al, 2011, 2013a; Wang C, et al, 2013; Wu, et al, 2014; Yeh, et al, 2014; Wang M, et al, 2018)。事实上, 我国学者早在 1985 年就已经认识到厄尔尼诺事件多样性特征 (符淙斌等, 1985; Fu, et al, 1986; 唐佑民等, 1994)。我国学者对两类 ENSO 的特征和机理研究做出了显著贡献。例如, Lian 等 (2012) 建议使用旋转 EOF 方法分析热带太平洋气候变率, 比 EOF 方法更可能得到接近真实情况的模态, 特别是针对 ENSO 主模态以外的第二个模态。Ren 等 (2013a) 发现两类 ENSO 中均存在明显的上层海洋热容量“充放电”过程, 有差别的“充电”振子机制在两类 ENSO 中扮演了重要角色, 温跃层反馈机制对两类 ENSO 的增长和位相转换均有重要贡献, 而纬向平流反馈机制主要贡献于位相转换。Wang L-C 等 (2013) 重点考察了两类厄尔尼诺期间区别较大的海洋环流型。Zheng 等 (2014) 发现由于两类厄尔尼诺发展阶段的海表面气压异常的纬向梯度与降水异常关系不同导致了对两类厄尔尼诺发展起重要作用的 Bjerknes 正反馈强度明显不同, 中部型的偏弱。Chen D 等 (2015) 指出厄尔尼诺是由自持振荡与西风爆发相互作用的结果, 前者提供了基本的动力框架, 后者则导致了厄尔尼诺的多样性产生。Li 等 (2015) 指出海洋垂直对流项对两类 ENSO 事件的不对称性有重要作用。Ren 等 (2016a) 提出了 ENSO 持续性障碍的量化指标, 发现 EP 型的春季障碍更强, 而 CP 型的夏季障碍偏弱。Duan 等 (2017) 强调了非线性温度平流对两类厄尔尼诺事件强度和空间模态的影响。

长期来看, 1980-1999 年期间东部型厄尔尼诺为主导, 在 2000 年之后转为以中部型为

主、同时温跃层反馈明显减弱，但纬向平流反馈则没有受到太大影响，而且事件的初始机制也在 2000 年之后有明显不同 (Hu, et al, 2013; Su, et al, 2014; Wang R, et al, 2017)。ENSO 除了 2000 年前后的年代际变化，在 20 世纪 70 年代末也经历了明显改变，Ren 等(2013b) 指出在 1980 年后除了东部型 ENSO 的属性变化，中部型 ENSO 也发生的越发频繁，这表明东部型和中部型 ENSO 可能分别对应着两个独立的两个不同周期模态，同时也发现通过剔除背景年代际信号可以清晰地区分出两类拉尼娜现象。Xie R 等 (2018) 则在改进的 ZC 模式中得到了两个物理机制不完全相同的类 ENSO 模态，分别是准两年模态和准四年模态，且这两个模态与模式中的两类厄尔尼诺紧密相关。陈永利等 (2005) 以及 Xu 等 (2012) 显示赤道太平洋次表层海温的年际和年代际变率与两类 ENSO 事件有关，并强调了年代际变率是产生中部型 ENSO 事件的重要原因。Xu 等 (2017) 则将赤道温跃层分解得到两个年际模态并强调了两个模态在两类厄尔尼诺中的重要作用。Jiang 等 (2018) 则主要讨论了冷舌模态在全球变暖背景下所发生的改变对 ENSO 多样性的影响。国内外已提出了多种方法来定义两类 ENSO，但是一个普遍的缺陷是中太平洋型 ENSO 的指数主要体现了年代际信号，其年际信号的捕捉能力相对较弱 (Ren, et al, 2013a; Sullivan, et al, 2017)。

### 3.4 ENSO 触发机制相关研究

上世纪八九十年代，我国学者对 ENSO 现象发生和维持机制的理论研究成果显著，主要从不稳定海气相互作用和赤道波动传播的角度对于 ENSO 循环动力学机制做出了系统性的阐述。这些研究利用了不同的热带海气耦合模式，发现 ENSO 事件的发生发展对于背景海气条件存在敏感性；换言之，ENSO 事件的发生发展可能存在一些显著的前兆因子或触发因子；同时，对于海气耦合系统中前期关键物理过程的把握，也是耦合模式预测 ENSO 事件的重要前提之一。大约上世纪 90 年代起，我国学者发表了一系列关于 ENSO 事件触发机制问题的研究成果，指出了海气系统中包括纬向风异常、次表层海温异常等多个可能的 ENSO 事件触发因子。观测分析表明，在厄尔尼诺事件发展之前，热带东印度洋-西太平洋上空低层存在显著的纬向西风或风应力异常，并自暖池区域向东传播，对应着赤道中、东太平洋海表温度相继增温 (傅云飞等, 1996; Huang, et al, 1998; 张人禾等, 1998; 黄荣辉等, 2001)。与此同时，厄尔尼诺事件发生前暖池次表层海温也有明显上升和东传，与厄尔尼诺事件爆发与传播特征有直接关系，并且次表层暖水东传的原因正是西太平洋地区西风异常的产生与东扩 (李崇银等, 1999)，甚至其源头可能追溯到超前事件两年的赤道印度洋西风异常 (巢清尘等, 2001)，拉尼娜事件发展之前也存在相对应的赤道东风异常和冷海温异常。

动力学分析和模式试验证实，前期纬向风场和暖池次表层海温异常产生 ENSO 海温异常的物理过程与已有动力学理论可以相互印证，其对 ENSO 事件的可能触发机制在多种简单耦合模型和复杂模式中都能够较好地再现 (傅云飞等, 1996; 巢纪平等, 1998, 2002; 张人禾等, 1998; 周广庆等, 1999; 严邦良等, 2001, 2002)。并且不同海域和类型的前期纬向

---

风强迫及其演变还可能导致 ENSO 事件发生和演变特征的多样性。数值试验分析表明，赤道暖池纬向西风异常本身及通过激发的东传暖性开尔文波，可以引起 ENSO 暖海温异常的产生及东传，而东边界由于反射作用产生的西传暖性罗斯贝波，又对厄尔尼诺暖海温的维持和西传具有重要作用（严邦良等，2002），两个波动的叠加还可能造成某些厄尔尼诺事件中出现两次暖海温异常峰值（严邦良等，2001）；而纬向东风异常则可能通过激发出相应的冷性波动造成厄尔尼诺事件的衰亡与转相，两种风场异常响应的相对大小对 ENSO 事件的持续时间有重要影响（张人禾等，1998）。巢纪平等（1998，2002）通过简单理论模式对比了赤道太平洋东、西边界对纬向风响应的动力过程，指出热带西太平洋在赤道信风的激发下可以形成动力边界层结构，使得来自风应力的能量在暖池附近聚集和维持，当出现西风异常时暖池的初始海温异常可以进一步快速东传并伴随海气耦合不稳定得以发展；而东边界不存在这样的特性，从而强调了热带西太平洋在 ENSO 事件触发中的作用。这一理论也在某种意义上将纬向西风和前期的暖池次表层海温异常的触发机制有机结合在一起。

ENSO 事件发生前期通常出现爆发性的高频纬向西风异常（Westerly Wind Bursts, WWB）。Rong 等（2011）通过数值试验阐述了高频纬向西风如何通过大气与海洋的整流效应将高频异常信号转化为年际尺度的 ENSO 海温异常。Lian 等（2014）通过观测与试验对比了两类厄尔尼诺事件与 WWB 的联系，指出 WWB 在厄尔尼诺海温异常的多样性以及极端事件的产生中均可能具有重要作用，具体发挥何种影响取决于 WWB 出现的时机与赤道太平洋“充放电”位相的匹配关系。除了上述关于风场与海温异常的分析，我国学者还对其他可能的 ENSO 触发因子进行了探究。例如，西太平洋区域的热带气旋活动对 ENSO 事件发生发展具有重要影响（Lian, et al, 2019; Wang Q, et al, 2019）

### 3.5 ENSO 与其他现象的相互作用

我国学者上世纪 80 年代起开展了大量关于 ENSO 与其他气候现象的相互作用研究，对其物理机制的动力学理解也逐步加深。除了气候平均态，低纬度大气运动通常还可以划分为高频天气尺度系统、季节内振荡和包括 ENSO 响应在内的年际以上低频变率。李崇银等的一系列工作较为清楚地阐明了 ENSO 与其他现象之间的相互影响与能量流转（Li, 1989, 1990; 李崇银等, 1994, 1995）。观测与模式模拟的结果都表明，东亚冬季风异常与 ENSO 事件存在明显的相互作用（Li, 1990; 李崇银等, 1998, 2000）。强东亚冬季风背景下，东亚大陆强寒潮活动可以导致能量向赤道中心太平洋频繁输送，导致信风减弱和辐合增强，从而成为厄尔尼诺触发的可能原因之一（Li, 1989）；同时，西太平洋大范围积云对流活动的增强，还可以通过积云对流加热反馈激发强热带大气季节内振荡，并可能进一步经由大尺度海气相互作用触发厄尔尼诺事件（李崇银等, 1994）；对于年际变率，南印度洋和西北太平洋的异常反气旋对中存在明显的准两年信号，在 ENSO 与冬季风相互作用中扮演了重要角色（Li, et al, 2007）。而且，当厄尔尼诺发展起来之后，也相应对其他现象都会产生调制作用。

ENSO 现象的发展过程中存在锁相性，与其他气候系统之间的相互作用强弱也表现出明显的季节变化特征，年循环过程在其中扮演着重要的作用。除了线性的组合，ENSO 与热带太平洋的大气年循环还可以产生非线性的相互作用导致时间尺度上的高频衍生，从而产生一个独立的、经向非对称的风场异常模态，被称为“ENSO 年循环组合模态” (Zhang, et al, 2015a)。Ren 等 (2016b) 证实了这种非线性相互作用特征和机制可以被大多数当代气候模式较好模拟，并且与 ENSO 自身的模拟性能密切相关。借助于该模态，李海燕等 (2016) 就强厄尔尼诺背景对春季西北太平洋反气旋和东亚降水的影响给出了一种新的理解和认识。

随着海洋观测增多以及模式的不断发展，近些年来学界对于 ENSO 动力学的理解已经不仅仅局限于常规的气象要素反馈，也涉及到海洋盐度 (例如, Kang, et al, 2014; Chi, et al, 2019) 甚至海洋生物学系统 (例如, Kang, et al, 2017) 等相互作用过程也被考虑进来。Zheng 等 (2012) 和 Zhang 等 (2015) 研究表明，淡水通量引起的海洋盐度变化与热带太平洋海温之间存在明显的正反馈过程；Zhang R-H 等 (2009, 2011) 通过分析太阳辐射穿透深度与海温的关系，间接建立了海洋生物活动与海温的负反馈过程及其参数化方案 (Zhang, 2015a, 2015b)。在上述基础上，Zhang (2015c) 和 Zhang 等 (2015) 构建了包括淡水通量强迫和海洋生物强迫过程在内的海气耦合模式，并通过一系列分析和数值试验指出这两类反馈过程可能对 ENSO 的年际变率振幅和振荡周期的变化存在重要的影响。

### 3.6 外部强迫与大气遥相关

太阳辐射、火山活动以及温室气体等外部强迫对 ENSO 存在影响，我国学者对此也做了相关研究。太阳活动对 ENSO 的 SST 异常强度与空间模态均有影响，特别是在 ENSO 发展年秋季，热带西太平洋 SST 异常在太阳活动的高年较弱、在低年较强 (周群等, 2012)。热带火山爆发也会直接影响到 ENSO 演变，前者会使热带中东太平洋异常变冷、而在次年异常变暖 (Li, et al, 2013)，使得 ENSO 对其也有一个负-正-负的响应过程 (Wang T, et al, 2018)。南北半球的火山活动会给热带太平洋带来不同的影响，北半球及热带地区的火山爆发会使东部型厄尔尼诺在下一个冬天发展并达到峰值，而南半球火山爆发则会导致类中部型厄尔尼诺的响应特征 (Liu, et al, 2018)。除了对 ENSO 的直接影响以外，火山活动引起的有效太阳辐射的变化会导致热带东太平洋产生年代际尺度的类 ENSO 振荡，通过影响热带太平洋地区的背景态进而对 ENSO 造成影响 (Liu, et al, 2015)。

ENSO 可以通过激发大气环流异常以遥相关的形式将热带太平洋的异常信号与全球各个区域的气候异常现象联系起来。例如，ENSO 可以通过激发太平洋-北美型遥相关 (PNA) 从而对北太平洋和北美地区施加影响。然而这些由 ENSO 激发的遥相关型并不是一成不变的，我国学者研究表明，由于近些年中部型厄尔尼诺的频繁出现，ENSO 现象的遥相关影响在年代际尺度上表现出了明显变化，这与两种类型事件的变化密切相关 (Zhang, et al, 2012)。上世纪 90 年代之后热带太平洋降水型明显向中部型厄尔尼诺响应转变。在此加热条件下，



---

北半球春季自热带太平洋向北至北大西洋上空可以激发出明显的大气遥相关波列；而在东部型厄尔尼诺的强迫下该遥相关型则不明显。因此，ENSO 结构多样性造成的加热强迫位置差异对其后续遥相关的发展具有关键影响，这一结论在波作用通量诊断和数值试验中得到了进一步验证 (Guo, et al, 2019)。

### 3.7 气候变化与 ENSO 响应

随着全球变暖趋势的加剧，未来气候变化背景下，热带太平洋背景态以及 ENSO 时空特征的响应成为了相关研究的热点。基于耦合模式对不同气候变化情境的模拟结果，许多研究发现全球变暖对热带太平洋地区的背景态存在显著影响，包括影响热带太平洋冷舌模态以及赤道内外的背景温度梯度变化进而对 ENSO 的时空特征产生影响 (邓林等, 2010; Chen L, et al, 2015; Chen L, et al, 2017; Jiang, et al, 2018)。Zheng X-T 等 (2016) 的研究发现，不同模式中热带太平洋 SST 异常空间分布对全球变暖情境的响应存在很大不确定性，而赤道东太平洋平均态变冷还是变暖将导致未来 ENSO 振幅呈现相反的变化。Cai 等 (2014, 2015, 2018) 则指出，尽管目前不同模式模拟出的海温异常响应的强度和中心位置仍存在差异，现有的模式结果仍然表现出全球变暖影响下，赤道东太平洋海温变率将显著增加，具有极端振幅的超强厄尔尼诺和拉尼娜事件将更加频繁发生。

除了 ENSO 自身结构的多样性，全球变暖趋势也可能导致 ENSO 的遥相关响应发生改变。例如，Zhou 等 (2014) 通过数值试验讨论了在全球变暖背景下 ENSO 在太平洋北美区域上空大气遥相关的变化，指出在更暖的气候态背景下，东太平洋将更容易产生深对流，厄尔尼诺引起的赤道太平洋降水异常增强并东移，对应强迫产生的 PNA 型中心位置也随之东移。Tao 等 (2015) 考察了 ENSO 对印度洋遥相关的年代际转变，全球变暖影响到热带大气饱和比湿进一步增加，最终导致厄尔尼诺引起的热带印度洋增暖进一步加强。因此，全球变暖造成气候平均态改变，对 ENSO 遥相关响应的位置和强度均具有一定的调制作用。

## 4 ENSO 预测

ENSO 作为年际变率的最强信号，对全球天气和气候具有重要影响，监测 ENSO 当前状态并预测其未来演变情况，对于开展气温和降水等气候要素异常的预测至关重要。因此，ENSO 预测问题一直是国内外研究热点 (Luo, et al, 2016)。Tang 等 (2018) 对近些年来国内外 ENSO 预测和可预报性研究进行了详细介绍，这里主要着眼于我国学者在 ENSO 预测方法和应用研究方面进行回顾。

### 4.1 动力-统计 ENSO 预测方法

ENSO 预测的基本方法主要包括统计模型和动力模式，我国学者在这方面做出了系统性

贡献。一般而言，统计模型通过寻找 ENSO 信号与预测因子之间线性和非线性关系来建立，常用的统计方法包括：持续性预测、相似分析、线性多元回归、线性马可夫链、线性逆模型、典型相关分析、非线性神经网络以及机器学习等。多年来，基于 ENSO 动力学机理发展的统计预测模型，因其物理意义明确、简便易行，一直在 ENSO 预测中稳定发挥作用，仍被广泛使用 (Clarke, 2014)。我国学者近期运用 ENSO 的充电振子机制原理、并广泛吸纳外部影响因素，建立的统计预测模型能有效提升预报技巧 (Ren, et al, 2019c; Wang Q, et al, 2019)。

动力模式通过求解海气系统的物理方程组来预测 ENSO，包括相对简单的热带海气耦合模式 (例如, Chen, et al, 2004)、中等复杂程度的混合动力模式 (Zhang, 2015c; Zheng F, et al, 2016) 和复杂完备的全球海气耦合模式/气候系统模式 (例如, Luo, et al, 2005, 2008; 任宏利等, 2016; 包庆等, 2019)。近二十年来，国际上 ENSO 的动力模式预测已向多模式集合预测方向快速发展，我国学者研发的中国多模式集合预测业务系统 (CMME) 主要利用国内多个气候模式，实现了 ENSO 多模式集合平均预测产品的实时发布 (Ren, et al, 2019b)。由美国哥伦比亚大学的国际研究所 (IRI) 每月搜集并发布国际上 20 余个动力模式和统计模型提供的 Niño3.4 指数预报结果 (Barnston, et al, 2012)，其中大多数的实时 ENSO 预测系统可提供未来半年到一年的预测结果，这已经成为国际上最具影响力的 ENSO 预测参考信息。此外，我国学者针对动力模式预报存在时变误差的状况，还提出了利用历史资料信息对模式的 ENSO 预测结果进行改进的相似误差订正等方法 (Ren, et al, 2014; 王琳等, 2017; Liu, et al, 2017)。

无论是统计还是动力的 ENSO 预测，都会遇到春季预报障碍问题，即预报技巧在跨越春季时呈现急剧下滑的现象，这影响到气候预测领域的很多方面都有类似的障碍发生。我国学者在解释障碍现象成因和削弱预测障碍方面开展了有特色的研究工作。Mu 等 (2007) 和 Duan 等 (2009) 认为春季预报障碍与特定类型的初始误差有关，Chen D 等 (2015) 则认为其可能与海气耦合强度的季节变化有关。杨崧等 (2018) 基于 ENSO 与亚洲季风各自的季节锁相特征，从海气不稳定扰动角度阐述了 ENSO 春季预报障碍特征的可能成因。Tian 等 (2019) 指出 ENSO 持续性障碍的强度与热带太平洋 SST 振幅的季节性以及 ENSO 锁相的强度密切相关。Ren 等 (2019c) 进一步发现通过在统计预测模型中条件性地引入热带大西洋北部 SST 作为新的预报因子，能够显著削弱 EP 型 ENSO 的春季预报障碍以及 CP 型 ENSO 的夏季预报障碍。

## 4.2 ENSO 预测系统与应用

过去三十多年，随着热带海气相互作用与 ENSO 动力学认识的不断深入、热带太平洋海气系统监测体系的逐步建立以及气候系统模式发展的长足进步，ENSO 预测已成为当代气候研究的焦点问题之一 (Ren, et al, 2017a)。在国家“九五”重中之重科技项目“我国短期气候预测系统的研究” (1996-2000 年) 支持下，国家气候中心率先开展 ENSO 预测业务，建立了基于中等复杂程度模式的第一代 ENSO 预测系统 (丁一汇等, 2004)。同时，中国科学院

---

大气物理研究所利用 IAP 热带太平洋和 IAP 2L 全球大气环流耦合模式,设计了“气候异常”初始化方案并进行了十几年的系统性后报试验,建立了 IAP ENSO 预测系统(周广庆等,1998; Zhou, et al, 2001),这是目前国内少数使用 CGCM 开展 ENSO 预报的系统之一。此外,也有一些研究采用统计学方法预测 ENSO (宋家喜等,1997;丁裕国等,2002)。此后,中科院大气所在一个中等复杂程度耦合模式基础上通过发展耦合同化新方法和随机模式误差扰动的集合预测新手段,建立了一个大样本的 ENSO 集合预测系统(Zheng, et al, 2006, 2007, 2010, 2015b, 2016),预测效果较好,广泛应用于我国气候预测业务和防灾减灾(郑飞等,2016)。

当前,针对不同复杂程度的动力耦合和统计预测模式,超前 6~12 个月的 ENSO 预报技巧具有一定的参考价值。尽管如此,准确地预报出 ENSO 事件的强度和爆发时间,仍然是一个严峻的挑战(例如, Barnston, et al, 2012)。比如,对 2015 年爆发的超强厄尔尼诺事件,国际上大多数 ENSO 预测模式从 3 月份起始,仅有一个模式预测出年底厄尔尼诺事件强度将超过  $2.0^{\circ}\text{C}$ ,大部分模式预测结果均处在  $1.0^{\circ}\text{C}$  以下,甚至有模式预测将出现拉尼娜事件(郑飞等,2016;穆穆等,2017)。直到 6 月份起始时,大部分模式才预测出年底可能出现厄尔尼诺事件,而对其强度的预测仍存在着较大的差别,仅 4 个模式预测出年底厄尔尼诺事件强度将超过  $2.0^{\circ}\text{C}$ (Tang, et al, 2018)。因此,如何进一步提高 ENSO 预测准确率,并延长 ENSO 预测时效,是国际上的研究热点和极具挑战性的问题。此外,随着近三十年 CP 型 ENSO 事件的频繁发生,不同类型事件对于东亚和我国气候的影响有着明显差别。然而,国际上针对两类 ENSO 的研究相对较少,现有动力模式对 EP 型 ENSO 预测效果普遍优于 CP 型(Yang, et al, 2014),但当代国际上主流业务模式系统中的大多数还不能有效区分两类 ENSO 事件(Ren, et al, 2019a)。与此同时,2000 年后的 ENSO 预报技巧呈现出年代际下降趋势(Barnston, et al, 2012)。因而,针对不同年代际背景下、两类 ENSO 事件的进行动力和统计可预报性研究,并开展面向两类 ENSO 的预测技术研发是当下气候预测研究工作的关键内容。

随着 ENSO 呈现多样性变化趋势,原有 ENSO 预测业务系统已逐渐无法满足日益增长的业务新需求。自 2013 年起,国家气候中心开展了对新一代 ENSO 监测预测业务系统研发工作,已经在科研和关键技术以及预测水平等方面取得了显著进展。经过数年时间的努力,在两类 ENSO 监测指标、动力学诊断分析技术、面向两类 ENSO 的统计预报模型、气候模式预测及其统计订正预报等方面已取得显著进展,建成了新一代 ENSO 监测、分析和预测系统(SEMAP2.0)(任宏利等,2016; Ren et al., 2017a, 2017b, 2018)。从 2013 年春开始,该系统连续多次在 ENSO 业务会商上应用并给出预报意见,效果较好。2015 年 12 月该系统正式业务运行于国家级和省级气候监测预测业务。随着国家级 ENSO 预测业务系统的发展,我国 ENSO 业务预测水平不断提升,提前半年 Nino3.4 指数预测技巧达到 0.8,跻身国际先进行列,受到了越来越多的国际关注。2017 年 5 月和 2019 年 1 月,SEMAP2.0 的动力和统计两种 ENSO 预测

---

产品分别纳入到 IRI 发布的 ENSO 多模式集合预测框架,实时产品同国外各家 ENSO 业务预测产品同期发布,这对于扩大我国 ENSO 业务预测的国际影响力迈出了重要一步。

## 5 结语

本文从热带海气相互作用、ENSO 动力学以及 ENSO 预测三个方面对近 70 年来我国气象和海洋学界取得的相关进展做出了梳理和总结。我国地处东亚显著受到热带印度洋以及热带太平洋海气系统的影响,而热带太平洋的 ENSO 循环作为全球最强的年际变率更是对我国有重大影响。研究热带海气相互作用以及 ENSO 循环对于我国气候预测有重要意义。近 70 年来我国学者对热带海气系统的研究越发全面和深入,对 ENSO 的相关研究从早期以波动动力学为主逐渐铺展开来,发展成为囊括 ENSO 动力机制、物理过程、时空特征多样性及复杂性、与热带三大洋及中高纬相互作用,ENSO 数值模拟及预测等诸多方面,特别是在进入 21 世纪以后,相关研究呈现出井喷式的发展、大量优秀成果得以涌现。

然而,随着研究的深入,所遇到的问题也越来越复杂,目前在 ENSO 及其相关方面仍然存在不少未知以及挑战。历史上没有完全相同的两次 ENSO 事件,尽管目前普遍接受从空间模态上可以将 ENSO 简单分为东部型与中部型两类,但对于两类 ENSO 的发生发展机制、气候影响,以及对未来气候变化响应的差异,仍然存在进一步探究的空间。同时,这样的划分方法也并不能完全解释 ENSO 的空间多样性特征。ENSO 作为主周期为 2-7 年的振荡现象,其时间演变也呈多样化,涉及了天气、季节、年际以及年代际等不同时间尺度过程。随着对 ENSO 时间-空间多样性认识的深入,二者也被联合概括为 ENSO 的复杂性问题,并已受到越来越多的关注。现有研究还发现 ENSO 发生发展及其气候影响存在诸多不对称和极端特征,单纯的线性描述已经难以满足当前理解 ENSO 动力机理及其气候影响的需求,而非线性过程作为影响 ENSO 的重要因素仍需要更深入的研究。目前学界对 ENSO 复杂性不仅缺乏足够的理解,更缺乏描述其复杂性的完善动力理论,当前模式也还无法准确再现 ENSO 的时空多样性特征。

全球气候系统作为一个相互联系的整体,ENSO 与不同地区和时间尺度气候变率的相互作用,特别是海盆间相互作用,不仅是当下 ENSO 机理和影响研究的热点,也是改善模式模拟能力的重要因素。目前大西洋和印度洋的气候变率通过海盆间相互作用对热带太平洋以及 ENSO 的影响已受到广泛关注;同时,ENSO 与季节内变率(例如大气季节内振荡)、气候态年循环、年际变率(例如 IOD)以及年代际变率(例如 PDO)等不同时间尺度变率间的调制和相互作用,对这些机制的具体物理过程和动力描述,以及这些机制对气候变化情境的响应,仍需进一步的理解。

随着全球变暖加剧,海洋吸收了更多的热量,未来热带太平洋气候背景态会有怎样的变化仍有极大的不确定性,而受背景态影响的 ENSO 必然呈现出更为复杂的变化。这会对 ENSO 以及相关的气候异常预测产生巨大影响。在变化的气候中,已有的大量 ENSO 特征和机理认知可能会发生改变,导致建立在已有认知上的物理统计模型和动力模式中的经验部分很可能



---

性能变差甚至失效。因此, 研究未来气候变化情境下 ENSO 的强度、频率、时空特征和气候影响变化具有重要的科学意义和实际价值。

目前 ENSO 预测仍然存在很大不确定性, 其影响因素有很多, 随着热带太平洋观测系统 (TPOS) 等提供的海气系统一手观测资料的日益增多, 一方面需要完善现有甚至重新认识热带海气相互作用和 ENSO 动力学, 以及海洋生物过程和化学过程等诸多方面, 另一方面开展完备气候模式的耦合资料同化技术发展变得尤为重要。尽管气候系统模式得到快速发展, 但当代模式对于 ENSO 多样性和复杂性的模拟刻画能力还不理想, 例如对两种类型 ENSO 现象的区分能力薄弱, 亟待对模式本身性能进行改进和提升。在此基础上, 充分利用统计工具 (包括传统方法和机器学习等新技术) 对动力模式预测进行修正和改进, 也不失为一条提升预测准确率的有效途径。综上, 我国学者应再接再厉、做出更多创新成果。

### 参考文献

- 包庆, 吴小飞, 李矜霄等. 2019. 2018~2019 年秋冬季厄尔尼诺和印度洋偶极子的预测. 科学通报, 64: 73-78. Bao Q, Wu X F, Li J X, et al. 2019. Outlook for El Niño and the Indian Ocean Dipole in autumn-winter 2018-2019. Chin Sci Bull, 64: 73-78 (in Chinese)
- 蔡怡, 李海, 张人禾. 2008. 热带印度洋海温异常与 ENSO 关系的进一步研究. 气象学报, 66(1): 120-124. Cai Y, Li H, Zhang R. 2008. A study on relationship between ENSO and tropical Indian Ocean temperature. Acta Meteor Sinica, 66(1):120-124 (in Chinese)
- 巢纪平, 张人禾. 1990. 热带海气相互作用波及其不稳定性. 气象学报, 48(1): 46-54. Chao J, Zhang R. 1990. The air-sea interaction waves in the Tropics and their instabilities. Acta Meteor Sinica, 48(1): 46-54 (in Chinese)
- 巢纪平. 1993. 厄尔尼诺与南方涛动动力学. 北京: 气象出版社, 2-3. Chao J. 1993. El Niño and Southern Oscillation Dynamics. Beijing: China Meteorological Press, 2-3 (in Chinese)
- 巢纪平, 王彰贵. 1993. 简单的热带海气耦合波——Rossby 和 Kelvin 波的相互作用. 气象学报, 51(3): 257-265. Chao J, Wang Z G. 1993. Simple air-sea coupled waves in the Tropics—the interaction between Rossby and Kelvin waves. Acta Meteor Sinica, 51(3): 257-265 (in Chinese)
- 巢纪平, 张丽. 1998. 赤道不同海域对信风张弛的响应特征——对 El Nino 研究的启示. 大气科学, 22(4): 44-58. Chao J, Zhang L. 1998. Responding characteristics of different regions over the tropical oceans to relaxation of the trade winds—a consideration to El Niño studies. Sci Atmos Sinica, 22(4): 44-58 (in Chinese)
- 巢纪平. 2002. ENSO——热带海洋和大气中和谐的海气相互作用现象. 海洋科学进展, 20(3): 1-8. Chao J. 2002. ENSO: The harmonic ocean-atmosphere interaction in Tropics. Adv Mar Sci, 20(3): 1-8 (in Chinese)
- 巢纪平, 巢清尘. 2002. 热带西太平洋对风应力响应的动力学. 大气科学, 26(2): 145-160. Chao J, Chao Q C. 2002. The dynamics of the response of tropical western Pacific

- 
- to wind stress. *Chinese J Atmos Sci*, 26(2):145-160 (in Chinese)
- 巢纪平, 袁绍宇. 2003a. 热带印度洋和太平洋海气相互作用事件间的联系. *自然科学进展*, 13(12): 1280-1285. Chao J, Yuan S Y. 2003a. Relationship of air-sea interaction in the tropical Pacific and Indian Ocean. *Prog Nat Sci*, 13(12): 1280-1285 (in Chinese)
- 巢纪平, 袁绍宇, 蔡怡. 2003b. 热带印度洋的大尺度海气相互作用事件. *气象学报*, 61(2): 251-256. Chao J, Yuan S Y, Cai Y. 2003b. Large-scale air-sea interaction in the tropical Indian Ocean. *Acta Meteor Sinica*, 61(2): 251-256 (in Chinese)
- 巢纪平, 袁绍宇. 2004. 热带印度洋和太平洋海气相互作用事件的协调发展. *海洋科学进展*, 22(3): 247-252. Chao J, Yuan S Y. 2004. Concerted development of atmosphere-ocean interaction events in the tropical Indian Ocean and Pacific Ocean. *Adv Mar Sci*, 22(3): 247-252 (in Chinese)
- 巢纪平, 巢清尘, 刘琳. 2005. 热带太平洋 ENSO 事件和印度洋的 DIPOLE 事件. *气象学报*, 63(5): 594-602. Chao J, Chao Q C, Liu L. 2005. The ENSO events in the tropical Pacific and Dipole events in the Indian Ocean. *Acta Meteor Sinica*, 63(5): 594-602 (in Chinese)
- 巢清尘, 巢纪平. 2001. 热带西太平洋和东印度洋对 ENSO 发展的影响. *自然科学进展*, 11(12): 1293-1300. Chao Q C, Chao J. 2001. The influence of western tropical Pacific and eastern Indian Ocean on the development of ENSO event. *Prog Nat Sci*, 11(12): 1293-1300 (in Chinese)
- 陈锦年, 宋贵霆, 褚健婷等. 2003. 北赤道流区海温异常与 ENSO 循环. *热带海洋学报*, 22(4): 10-17. Chen J N, Song G T, Chu J T, et al. 2003. Anomalous sea temperature of westward transferring north equatorial current and ENSO. *J Trop Oceanogr*, 22(4):10-17 (in Chinese)
- 陈烈庭. 1982. 北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用. *大气科学*, 6(2): 148-156. Chen L T. 1982. Interaction between the subtropical high over the North Pacific and the sea surface temperature of the eastern equatorial Pacific. *Sci Atmos Sinica*, 6(2): 148-156 (in Chinese)
- 陈永利, 赵永平, 张勳宁等. 2005. 赤道太平洋次表层海温异常年际和年代际变率特征与 ENSO 循环. *海洋学报(中文版)*, 27(2): 39-45. Chen Y L, Zhao Y P, Zhang M N, et al. 2005. The characteristics of interannual and interdecadal variability of equatorial Pacific Ocean temperature anomalies and ENSO cycle. *Acta Oceanol Sin*, 27(2): 39-45 (in Chinese)
- 邓北胜, 刘海涛, 丑纪范. 2010. ENSO 事件期间热带印度洋和太平洋地区大尺度海气相互作用联系的研究. *热带气象学报*, 26(3): 357-363. Deng B S, Liu H T, Chou J F. 2010. Analysis of the linkages of large-scale air-sea interaction between the tropical Indian Ocean and the Pacific Ocean during El Niño events. *J Trop Meteor*, 26(3): 357-363 (in Chinese)
- 邓林, 杨修群, 谢倩. 2010. 二氧化碳浓度增加情景下耦合气候模式中的 ENSO 频率变化及其机制. *科学通报*, 55(2): 163-170. Deng L, Yang X-Q, Xie Q. 2010. Frequency variation of ENSO and its mechanism in coupled climate model under increasing carbon dioxide concentration. *Chin Sci Bull*, 55(2): 163-170 (in Chinese)

- 
- 丁一汇, 李清泉, 李维京等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展. 气象学报, 62(5), 598-612. Ding Y H, Li Q Q, Li W J, et al. 2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China. Acta Meteor Sinica, 62(5): 598-612 (in Chinese)
- 丁裕国, 程正泉, 程炳岩. 2002. MSSA-SVD 典型回归模型及其用于 ENSO 预报的试验. 气象学报, 60(3), 361-369. Ding Y G, Cheng Z Q, Cheng B Y. 2002. A prediction experiment by using the generalized canonical mixed regression model based on MSSA-SVD for ENSO. Acta Meteor Sinica, 60(3), 361-369 (in Chinese)
- 符淙斌, J. 弗莱彻. 1985. “厄尔尼诺”(El Nino)时期赤道增暖的两种类型. 科学通报, 30(8): 596-599. Fu C B, Fletcher J. 1985. Two types of equatorial warming at the time of El Niño. Chin Sci Bull, 30(8): 596-599 (in Chinese)
- 傅云飞, 黄荣辉. 1996. 热带太平洋西风异常对 ENSO 事件发生的作用. 大气科学, 20(6): 2-15. Fu Y F, Huang R H. 1996. The effect of the westerly anomalies over the tropical Pacific on the occurrence of ENSO events. Sci Atmos Sinica, 20(6): 2-15 (in Chinese)
- 黄荣辉, 张人禾, 严邦良. 2001. 热带西太平洋纬向风异常对 ENSO 循环的动力作用. 中国科学(D 辑:地球科学), 31(8): 697-704. Huang R H, Zhang R, Yan B L. 2001. Dynamical effect of the zonal wind anomalies over tropical western Pacific on ENSO cycles. Sci China Ser D-Earth Sci, 44: 1089-1098 (in Chinese)
- 季劲钧, 巢纪平. 1979. 热带海气耦合系统中的长周期振荡及大气中的赤道辐合带. 气象学报, 37(3): 32-43. Ji J J, Chao J. 1979. Long-range oscillations in the tropical ocean-atmospheric coupled system and intertropical convergence zone in the atmosphere. Acta Meteor Sinica, 37(3): 32-43 (in Chinese)
- 金飞飞, 朱抱真. 1988a. 海气耦合振荡非线性动力系统的平衡态研究. 中国科学(B 辑), 7: 777-786.
- 金飞飞, 朱抱真. 1988b. 海气耦合非线性振荡与大气环流年变. 大气科学, 12(4): 346-356.
- 李崇银, 周亚萍. 1994. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系. 地球物理学报, (1): 17-26. Li C, Zhou Y P. 1994. Relationship between intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere and ENSO. Acta Geophys Sinica, 37(1): 17-26 (in Chinese)
- 李崇银, 李桂龙. 1995. 同 El Nino 发生相联系的热带大气系统动能的变化. 科学通报, 40(20): 1866-1869.
- 李崇银, 穆明权. 1998. 异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究. 大气科学, 22(4): 97-106. Li C, Mu M Q. 1998. Numerical simulations of anomalous Winter Monsoon in East Asia exciting ENSO. Sci Atmos Sinica, 22(4): 97-106 (in Chinese)
- 李崇银, 穆明权. 1999. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常. 大气科学, 23(5): 513-521. Li C, Mu M Q, 1999. El Niño occurrence and sub-surface ocean temperature anomalies in the Pacific warm pool. Chinese J Atmos Sci, 23 (5): 513-521 (in Chinese)
- 李崇银, 穆明权. 2000. 东亚冬季风-暖池状况-ENSO 循环的关系. 科学通报, 45(7): 678-685. Li C, Mu M Q. 2000. Relationships of East Asian Winter Monsoon — warm pool — ENSO circulation. Chin Sci Bull, 45(7): 678-685 (in Chinese)

- 李崇银, 穆明权. 2001. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. 大气科学, 25(4): 433-443. Li C, Mu M Q. 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate. Chinese J Atmos Sci, 25(4): 433-443 (in Chinese)
- 李崇银, 穆明权. 2002. ENSO—赤道西太平洋异常纬向风所驱动的热带太平洋次表层海温距平的循环. 地球科学进展, 17(5): 631-638. Li C, Mu M Q. 2002. A further inquiry on essence of the ENSO cycle. Adv Earth Sci, 17(5): 631-638 (in Chinese)
- 李海燕, 张文君, 何金海. 2016. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响. 气象学报, 74(3): 322-334. Li H Y, Zhang W J, He J H. 2016. Influence of ENSO and its combination mode on seasonal precipitation over eastern China. Acta Meteor Sinica, 74(3): 322-334 (in Chinese)
- 李熠, 杨修群, 谢倩. 2010. 北太平洋副热带高压年际变异与 ENSO 循环之间的选择性相互作用. 地球物理学报, 53(7): 1543-1553. Li Y, Yang X-Q, Xie Q. 2010. Selective interaction between interannual variability of North Pacific Subtropical High and ENSO cycle. Chinese J. Geophys, 53(7): 1543-1553 (in Chinese)
- 连涛, 陈大可, TANG Y, 等. 2014. 热带印度洋-太平洋三极模态的理论探讨. 中国科学: 地球科学, 44(1): 169-186. Lian T, Chen D, Tang Y, et al. 2014. A theoretical investigation of the tropical Indo-Pacific tripole mode. Sci China Earth Sci, 57:174 - 188 (in Chinese)
- 刘秦玉, 范磊. 2009. 热带海洋-大气耦合的主模态. 中国海洋大学学报(自然科学版), 39(5): 815-821. Liu Q Y, Fan L. 2009. The leading mode of the tropical ocean-atmosphere coupling. J Ocean Univ China, 39(5): 815-821 (in Chinese)
- 孟文, 吴国雄. 2000. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 II. 数值模拟. 大气科学, 24(1): 15-25. Meng W, Wu G X. 2000. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific - Walker circulation and the ENSO. Part II: Numerical simulation. Chinese J. Atmos Sci, 24(1): 15-25 (in Chinese)
- 孟祥凤, 吴德星, 林霄沛. 2004. ENSO 循环相关的海洋异常信号传播特征及其机制. 热带海洋学报, 23(6): 22-29. Meng X F, Wu D X, Lin X P. 2004. Characteristics and mechanisms of transmission of oceanic anomaly signal related to ENSO cycles. J Trop Oceanogr, 23(6): 22-29 (in Chinese)
- 缪锦海, 刘家铭. 1989. ENSO 的海气耦合不稳定发生、发展理论. 中国科学(B 辑 化学 生命科学 地学), (10): 1112-1120
- 穆明权, 李崇银. 2000. 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的相互作用. 大气科学, 24(4): 447-460. Mu M Q, Li C. 2000. Interactions between subsurface ocean temperature anomalies in the western Pacific Warm Pool and ENSO cycle. Chinese J Atmos Sci, 24(4): 447-460 (in Chinese)
- 穆穆, 任宏利. 2017. 2014~2016 年超强厄尔尼诺事件研究及其预测给予我们的启示. 中国科学: 地球科学, 47(9): 993-995. Mu M, Ren H L. 2017. Enlightenment from researches and predictions of 2014-2016 super El Nino event. Sci China Ser D-Earth Sci, 60:1569-1571 (in Chinese)
- 乔方利, 于卫东, 袁业立. 2004. 厄尔尼诺/拉尼娜信号循环回路及其传播特性研究. 海洋学报(中文版), 26(4): 1-8. Qiao F L, Yu W D, Yuan L Y. 2004. On the circuit and propagation of El Nino/ La Nina signals. Acta Oceanol Sin, 26(4): 1-8 (in



- Chinese)
- 任宏利, 刘颖, 左金清等. 2016. 国家气候中心新一代 ENSO 预测系统及其对 2014/2016 年超强厄尔尼诺事件的预测. 气象, 42(5): 521-531. Ren, H L, Liu Y, Zuo J Q, et al. 2016. The new generation of ENSO prediction system in Beijing Climate Center and its prediction for the 2014/16 super El Niño event. Meteor Mon, 42(5): 521-531 (in Chinese)
- 容新尧, 杨修群. 2003. 全球海洋大气耦合环流模式中的 ENSO 特征对气候背景态改变的敏感性. 气象学报, 61(1): 52-65. Rong X Y, Yang X Q. 2003. Sensitivity of ENSO characteristics in a coupled ocean-atmosphere GCM to change of climatological background state. Acta Meteor Sinica, 61(1): 52-65 (in Chinese)
- 宋家喜. 1987. 热带大西洋西部纬向风异常与厄尔尼诺南方涛动的发生. 海洋学报. 9(1): 30-35
- 宋家喜, 王彰贵. 1997: El Niño 现象预测途径的重要进展—1997~1998 年将发生 El Niño 现象. 科学通报, 22, 2462-2463
- 谭言科, 张人禾, 何金海等. 2004. 热带印度洋海温的年际变化与 ENSO. 气象学报, 62(6): 831-840. Tan Y K, Zhang R, He J H, et al. 2004. Relationship of the interannual variations of sea surface temperature in tropical Indian Ocean to ENSO. Acta Meteor Sinica, 62(6): 831-840 (in Chinese)
- 唐佑民, 刘书华. 1994. 两类 El Niño 事件太平洋海温异常时空结构的分析. 热带气象学报, 10(2): 130-139. Tang Y, Liu S H. 1994. The temporal and spatial structure analyses of Pacific SSTA accompanying with two kinds of El Niño events. J Trop Meteor, 10(2): 130-139 (in Chinese)
- 王东晓, 刘赞, 刘钦燕等. 2003. 1997~1998 年 El Niño 期间印度洋和西太平洋上层海洋的联系. 自然科学进展, 13(9): 957-963. Wang D, Liu Y, Liu Q, et al. 2003. The relationship between Indian Ocean and western Pacific upper marine during El Niño in 1997-1998. Prog Nat Sci, 13(9): 957-963 (in Chinese)
- 王宏娜, 陈锦年, 刘钦燕. 2012. ENSO 循环过程中次表层海洋信号的传播和变化. 热带海洋学报, 31(2): 1-6. Wang H N, Chen J N, Liu Q Y. 2012. Propagation and variability of subsurface oceanic signal during ENSO cycle. J Trop Oceanogr, 31(2): 1-6 (in Chinese)
- 王琳, 任宏利, 陈权亮等. 2017. 基于逐步回归模态投影方法的 BCC 气候系统模式 ENSO 预报订正. 气象, 43(3): 294-304. Wang L, Ren H-L, Chen Q L, et al. 2017. Statistical correction of ENSO prediction in BCC\_CSM1.1m based on Stepwise Pattern Projection Method. Meteor Mon, 43(3): 294-304 (in Chinese)
- 吴国雄, 孙凤英, 王敬方等. 1995. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 II. 资料分析. 大气科学, 19(6): 663-676. Wu G X, Sun F Y, Wang J F, et al. 1995. Neighbourhood response of rainfall to tropical sea surface temperature anomalies. Part II: Data analysis. Acta Atmos Sinica, 19(6): 663-676 (in Chinese)
- 吴国雄, 孟文. 1998. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I. 资料分析. 大气科学, 22(4): 470-480. Wu G X, Meng W. 1998. Gearing between the Indo-Monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO, Part I: Data analyses. Chin J Atmos Sci, 22(4): 470-480 (in Chinese)

- 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. 2001. El Nino 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 II. 模式结果分析. 大气科学, 25(2): 160-172. Yan B L, Huang R L, Zhang R. 2001. Dynamical role of zonal wind stresses over the tropical Pacific in the occurring and vanishing of El Nino. Part II: Analyses of modeling results. Chinese J Atmos Sci, 25(2): 160-172 (in Chinese)
- 严邦良, 张人禾. 2002. 热带西太平洋风应力异常在 ENSO 循环中作用的数值试验. 大气科学, 26(3): 315-329. Yan B L, Zhang R. 2002. A numerical test of the effects of wind anomaly over the equatorial western Pacific on ENSO cycle. Chinese J Atmos Sci, 26(3): 315-329 (in Chinese)
- 杨崧, 邓开强, 段晚锁. 2018. 季风与 ENSO 的选择性相互作用: 年循环和春季预报障碍的影响. 大气科学, 42(3): 570-589. Yang S, Deng K Q, Duan W S. 2018. Selective interaction between monsoon and ENSO: Effects of annual cycle and spring predictability barrier. Chinese J Atmos Sci, 42(3): 570-589 (in Chinese)
- 杨修群, 谢倩, 黄士松. 1995. 热带海气耦合波动力学性质研究. 海洋学报(中文版), 17(2): 27-37
- 于卫东, 乔方利. 2003. ENSO 事件中热带太平洋上层海洋热含量变化分析. 海洋科学进展, 21(4): 446-453. Yu W D, Qiao F L. 2003. Analysis of heat content variability of the tropical Pacific upper ocean during ENSO events. Adv Mar Sci, 21(4): 446-453 (in Chinese)
- 袁媛, 李崇银. 2008. 热带印度洋偶极子与 ENSO 事件关系的年代际变化. 科学通报, 53(12): 1429-1436. Yuan Y, Li C. 2008. Inter-decadal variations in the relationship between the dipole mode in the tropical Indian Ocean and ENSO events. Chin Sci Bull, 53(12): 1429-1436 (in Chinese)
- 张勤, 丁一汇. 2001. 热带太平洋年代际平均气候态变化与 ENSO 循环. 气象学报, 59(2): 157-172. Zhang Q, Ding Y. 2001. Decadal climate change and ENSO cycle. Acta Meteor Sinica, 59(2): 157-172 (in Chinese)
- 张人禾, 巢纪平. 1994. 对热带不稳定海气相互作用模式的改进. 气象学报, 52: 350-358. Zhang R, Chao J. 1994. An improvement on the tropical unstable air-sea interaction model. Acta Meteor Sinica, 52: 350-358 (in Chinese)
- 张人禾. 1995. 简单热带海气耦合模式中的耦合波及其不稳定性 (I). 大气科学, 19(4): 455-464. Zhang R. 1995. Coupled waves in simple tropical air-sea interaction models and their instabilities (I). Chinese J Atmos Sci, 19(4): 455-464. (in Chinese)
- 张人禾, 黄荣辉. 1998. El Nino 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析. 大气科学, 22: 587-599. Zhang R, Huang R. 1998. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analyses. Chinese J Atmos Sci, 22: 587-599. (in Chinese)
- 赵永平, 陈永利, 王凡, 等. 2007. 热带太平洋海洋混合层水体振荡与 ENSO 循环. 中国科学(D辑:地球科学), 37(8): 1120-1133. Zhao Y, Chen Y, Wang F, et al. 2007. Mixed layer water oscillation over tropical Pacific Ocean and ENSO cycle. Sci China Ser D-Earth Sci, 37(8): 1120-1133. (in Chinese)

- 郑飞, 朱江, 张荣华等. 2016. 2015 年超级厄尔尼诺事件的成功预报. 中国科学院院刊, 31(2), 251-257. Zheng F, Zhu J, Zhang R-H, et al. 2016. Successful Prediction for the Super El Niño Event in 2015. Bull Chin Acad Sci, 31(2): 251-257 (in Chinese)
- 周广庆, 李旭, 曾庆存. 1998. 一个可供 ENSO 预测的海气耦合环流模式及 1997/1998 ENSO 的预测. 气候与环境研究, 3(4): 349-357. Zhou G-Q, Li X, Zeng Q-C. 1998. A coupled ocean-atmosphere general circulation model for ENSO prediction and 1997/1998 ENSO forecast. Climatic Environ Res, 3(4): 349-357 (in Chinese)
- 周广庆, 李崇银. 1999. 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 关系的 CGCM 模拟结果. 气候与环境研究, 4(4): 346-352. Zhou G-Q, Li C. 1999. Simulation on the relation between the subsurface temperature anomaly in western Pacific and ENSO by using CGCM. Climatic Environ Res, 4(4): 346-352 (in Chinese)
- 周群, 陈文. 2012. 太阳活动 11 年周期对 ENSO 事件海温异常演变和东亚降水的影响. 大气科学, 36(4): 851-862. Zhou Q, Chen W. 2012. Influence of the 11-year solar cycle on the evolution of ENSO-related SST anomalies and rainfall anomalies in East Asia. Chinese J Atmos Sci, 36(4): 851-862 (in Chinese)
- 朱抱真, 骆美霞, 黄荣辉. 1981. 大尺度海温扰动的动力不稳定与海温异常的形成. 中国科学, (6): 716-723 (未找到英文题目)
- 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? Bull Amer Meteor Soc, 93(5): 631-651
- Battisti D S, Hirst A C. 1989. Interannual variability in a tropical atmosphere - ocean model: Influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity. J Atmos Sci, 46(12): 1687-1712
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Wea Rev, 97(3): 163-172
- Cai W, Borlace S, Lengaigne M, et al. 2014. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. Nature Clim Change, 4: 111-116
- Cai W, Santoso A, Wang G, et al. 2015. ENSO and greenhouse warming. Nature Clim Change, 5: 849-859
- Cai W, Wang G, Dewitte B, et al. 2018. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. Nature, 564(7735): 201-206
- Cai W, Wu L, Lengaigne M, et al. 2019. Pantropical climate interactions. Science, 363: eaav4236
- Chao J, Zhang R. 1988. The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities. Acta Meteor Sinica, 2(3): 275-287
- Chao J, Yuan S, Chao Q, et al. 2002. A data analysis study on the evolution of the El Niño/ La Niña cycle. Adv Atmos Sci, 19(5): 837-844
- Chen D, Cane MA, Kaplan A, et al. 2004. Predictability of El Niño over the past 148 years. Nature 428:733 - 736.
- Chen D, Lian T, Fu C, et al. 2015. Strong influence of westerly wind bursts on El Niño diversity. Nature Geosci, 8(5): 339 - 345

- 
- Chen H-C, Hu Z-Z, Huang B, et al. 2016. The role of reversed equatorial zonal transport in terminating an ENSO event. *J Climate*, 29(16): 5859-5877
- Chen L, Yu Y, Sun D-Z. 2013. Cloud and water vapor feedbacks to the El Niño warming: Are they still biased in CMIP5 models? *J Climate*, 26(14): 4947 - 4961
- Chen L, Li T, Yu Y. 2015. Causes of strengthening and weakening of ENSO amplitude under global warming in four CMIP5 models. *J Climate*, 28(8): 3250 - 3274
- Chen L, Li T, Yu Y, et al. 2017. A possible explanation for the divergent projection of ENSO amplitude change under global warming. *Climate Dyn*, 49(11-12): 3799-3811
- Chen S-F, Wu R. 2017. An enhanced influence of sea surface temperature in the tropical northern Atlantic on the following winter ENSO since the early 1980s. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 10(2): 175-182
- Chen W, Lu R-Y, Dong B. 2014. Revisiting asymmetry for the decaying phases of El Niño and La Niña. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 7(4): 275-278
- Chi J, Du Y, Zhang Y, et al. 2019. A new perspective of the 2014/15 failed El Niño as seen from ocean salinity. *Sci Rep*, 9(1):2720
- Clarke A J. 2014. El Niño physics and El Niño predictability. *Annu Rev Mar Sci*, 6: 79-99
- Ding R, Li J, Tseng Y-h. 2015a. The impact of South Pacific extratropical forcing on ENSO and comparisons with the North Pacific. *Climate Dyn*, 44(7): 2017-2034
- Ding R, Li J, Tseng Y-h, et al. 2015b. Influence of the North Pacific Victoria mode on the Pacific ITCZ summer precipitation. *J Geophys Res: Atmospheres*, 120(3): 964-979
- Ding R, Li J, Tseng Y-h, et al. 2015c. The Victoria mode in the North Pacific linking extratropical sea level pressure variations to ENSO. *J Geophys Res: Atmospheres*, 120(1): 27-45
- Ding R, Li J, Tseng Y-h, et al. 2017a. Joint impact of North and South Pacific extratropical atmospheric variability on the onset of ENSO events. *J Geophys Res: Atmospheres*, 122(1): 279-298
- Ding R, Li J, Tseng Y-h, et al. 2017b. Linking a sea level pressure anomaly dipole over North America to the central Pacific El Niño. *Climate Dyn*, 49(4): 1321-1339
- Duan W, Liu X, Zhu K, et al. 2009. Exploring the initial errors that cause a significant “spring predictability barrier” for El Niño events. *J Geophys Res: Oceans*, 114: C04022
- Duan W, Zhang R, Yu Y, et al. 2013. The role of nonlinearities associated with air-sea coupling processes in El Niño’s peak-phase locking. *Sci China Earth Sci*, 56(11): 1988-1996
- Duan W, Huang C, Xu H. 2017. Nonlinearity modulating intensities and spatial structures of central Pacific and eastern Pacific El Niño events. *Adv Atmos Sci*, 34(6): 737-756
- Fu C, Diaz H F, Fletcher J O. 1986. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 114(9): 1716-1739



- 
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 106(449): 447-462
- Guo Y, Wen Z, Chen R, et al. 2019. Effect of boreal spring precipitation anomaly pattern change in the late 1990s over tropical Pacific on the atmospheric teleconnection. *Climate Dyn*, 52(1): 401-416
- Guo Y-P, Tan Z-M. 2018. The Hadley Circulation Regime Change: Combined Effect of the Western Pacific Warming and Increased ENSO Amplitude. *J Climate*, 31(23): 9739-9751
- He J, Yu Z, Yang X-Q. 2005. Temporal characteristics of Pacific Decadal Oscillation (PDO) and ENSO and their relationship analyzed with method of Empirical Mode Decomposition (EMD). *Acta Meteor Sinica*, 19(1): 83-92
- Hu Z-Z, Kumar A, Ren H-L, et al. 2013. Weakened interannual variability in the tropical Pacific Ocean since 2000. *J Climate*, 26(8): 2601-2613
- Hua L, Yu Y, Sun D-Z. 2015. A further study of ENSO rectification: Results from an OGCM with a seasonal cycle. *J Climate*, 28(4): 1362-1382
- Huang R, Zang X, Zhang R, et al. 1998. The westerly anomalies over the tropical pacific and their dynamical effect on the enso cycles during 1980 - 1994. *Adv Atmos Sci*, 15(2): 135-151
- Ji Z, Chao J. 1987. Teleconnections of the sea surface temperature in the indian ocean with sea surface temperature in the eastern equatorial pacific, and with the 500 hPa geopotential height field in the Northern Hemisphere. *Adv Atmos Sci*, 4(3): 343-348
- Ji Z, Chao J. 1990. Instability of the oceanic waves in the tropical region. *Acta Meteor Sinica*, 4(2): 135-145
- Jia F, Cai W, Wu L, et al. 2019. Weakening Atlantic Niño - Pacific connection under greenhouse warming. *Sci Adv*, 5, eaax4111
- Jiang N, Zhu C. 2018. Asymmetric changes of ENSO diversity modulated by the cold tongue mode under recent global warming. *Geophys Res Lett*, 45(22): 12506-12513
- Jin F-F. 1997a. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *J Atmos Sci*, 54(7): 811-829
- Jin F-F. 1997b. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A stripped-down coupled model. *J Atmos Sci*, 54(7): 830-847
- Kang X, Huang R, Wang Z, et al. 2014. Sensitivity of ENSO variability to Pacific freshwater flux adjustment in the Community Earth System Model. *Adv Atmos Sci*, 31(5): 1009-1021
- Kang X, Zhang R-H, Gao C, et al. 2017. An improved ENSO simulation by representing chlorophyll-induced climate feedback in the NCAR Community Earth System Model. *Sci Rep*, 7(1): 17123
- Kao H-Y, Yu J-Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *J Climate*, 22(3): 615-632
- Kug J-S, Jin F-F, An S-I. 2009. Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J Climate*, 22(6): 1499-1515

- 
- Li C. 1989. Frequent activities of stronger upper-level troughs in East Asia in wintertime and the occurrence of the El Niño event. *Sci China*, 32: 976–985
- Li C. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events. *Adv Atmos Sci*, 7(1): 36–46
- Li J, Xie S-P, Cook E R, et al. 2011. Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium. *Nature Clim Change*, 1(2): 114–118
- Li J, Xie S-P, Cook E R, et al. 2013. El Niño modulations over the past seven centuries. *Nature Clim Change*, 3(9): 822
- Li Y, Lu R, Dong B. 2007. The ENSO – Asian monsoon interaction in a coupled ocean – atmosphere GCM. *J Climate*, 20(20): 5164–5177
- Li Z, Xu H, Zhang W. 2015. Asymmetric features for two types of ENSO. *J Meteor Res*, 29(6): 896 – 916
- Lian T, Chen D. 2012. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical Pacific SST variability. *J Climate*, 25(15): 5361–5373
- Lian T, Chen D, Tang Y, et al. 2014. Effects of westerly wind bursts on El Niño: A new perspective. *Geophys Res Lett*, 41(10): 3522–3527
- Lian T, Ying J, Ren H-L, et al. 2019. Effects of tropical cyclones on ENSO. *J Climate*, 32(19): 6423 – 6443
- Liang J, Yang X-Q, Sun D-Z. 2012. The effect of ENSO events on the tropical Pacific mean climate: Insights from an analytical model. *J Climate*, 25(21): 7590–7606
- Liang J, Yang X-Q, Sun D-Z. 2017. Factors determining the asymmetry of ENSO. *J Climate*, 30(16): 6097–6106
- Lin R, Zheng F, Dong X. 2018. ENSO frequency asymmetry and the Pacific decadal oscillation in observations and 19 CMIP5 models. *Adv Atmos Sci*, 35(5): 495–506
- Liu F, Chai J, Huang G, et al. 2015. Modulation of decadal ENSO-like variation by effective solar radiation. *Dyn Atmos Oceans*, 72: 52–61
- Liu F, Li J, Wang B, et al. 2018. Divergent El Niño responses to volcanic eruptions at different latitudes over the past millennium. *Climate Dyn*, 50(9): 3799–3812
- Liu Y, Ren H-L. 2017. Improving ENSO prediction in CFSv2 with an analogue-based correction method, *International Journal of Climatology*, **37**(15), 5035 – 5046.
- Lu B, Ren H-L. 2016: Improving ENSO periodicity simulation by adjusting cumulus entrainment in BCC\_CSMs. *Dyn Atmos Oceans*, 76: 127–140
- Lu B, Jin F-F, Ren H-L. 2018a. A coupled dynamic index for ENSO periodicity. *J Climate*, 31(6): 2361–2376
- Lu B, Ren H-L, Eade R, et al. 2018b. Indian Ocean SST modes and their impacts as simulated in BCC-CSM1.1m and HadGEM3. *Adv Atmos Sci*, 35(8): 1035 – 1048
- Lu B, Ren H-L, Scaife A, et al. 2018c. An extreme negative Indian Ocean Dipole event in 2016: dynamics and predictability. *Climate Dyn*, 51(1–2): 89–100
- Lu Q, Ruan Z, Wang D-P, et al. 2017. Zonal transport from the western boundary and its role in warm water volume changes during ENSO. *J Phys Oceanogr*, 47(1): 211–225
- Luo J-J, Masson S, Behera S, et al. 2005. Seasonal climate predictability in a coupled

- 
- OAGCM using a different approach for ensemble forecasts. *J Climate*, 18(21): 4474–4497
- Luo J-J, Masson S, Behera S, et al. 2008. Extended ENSO predictions using a fully coupled ocean-atmosphere model. *J Climate*, 21(1): 84–93
- Luo J-J, Zhang R, Behera S, et al. 2010. Interaction between El Niño and extreme Indian Ocean Dipole. *J Climate*, 23(3): 726–742
- Luo J-J, Sasaki W, Masumoto Y. 2012. Indian Ocean warming modulates Pacific climate change. *Proc Natl Acad Sci*, 109(46): 18701–18706
- Luo J-J, Lee J-Y, Yuan C, et al. 2016. Current status of intraseasonal-seasonal-to-interannual prediction of the Indo-Pacific climate. Chapter 3 in *Indo-Pacific Climate Variability and Predictability* (eds. Yamagata, T. and S. Behera), World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, Vol 7, the World Scientific Publisher, pp 63–107
- Luo J-J, Liu G, Hendon H, et al. 2017. Inter-basin sources for two-year predictability of the multi-year La Niña event in 2010–2012. *Sci Rep*, 7(1): 2276
- Ma J, Xie S-P, Xu H. 2017. Contributions of the North Pacific meridional mode to ensemble spread of ENSO prediction. *J Climate*, 30(22): 9167–9181
- Min Q, Su J, Zhang R. 2017. Impact of the South and North Pacific Meridional Modes on the El Niño–Southern Oscillation: Observational analysis and comparison. *J Climate*, 30(5): 1705–1720
- Mu M, Xu H, Duan W. 2007. A kind of initial errors related to “spring predictability barrier” for El Niño events in Zebiak–Cane model. *Geophys Res Lett*, 34: L03709
- Nie Y, Ren H-L, Zhang Y. 2019. The role of extratropical air-sea interaction in the autumn subseasonal variability of North Atlantic Oscillation. *J Climate*. 32, 7697–7712
- Qian W, Hu H. 2005. Signal propagations and linkages of subsurface temperature anomalies in the tropical Pacific and Indian Ocean. *Prog Nat Sci*, 15(9): 804–809
- Ren H-L, Jin F-F. 2011. Niño indices for two types of ENSO. *Geophys Res Lett*, 38: L04704
- Ren H-L, Jin F-F. 2013a. Recharge oscillator mechanisms in two types of ENSO. *J Climate*, 26(17): 6506–6523
- Ren H-L, Jin F-F, Stuecker M F, et al. 2013b. ENSO regime change since the late 1970s as manifested by two types of ENSO. *J Meteor Soc Japan. Ser. II*, 91(6): 835–842
- Ren H-L, Liu Y, Jin F-F, et al. 2014. Application of the analogue-based correction of errors method in ENSO prediction. *Atmos. Ocea Sci Lett*, 7(2), 157–161.
- Ren H-L, Jin F-F, Tian B, et al. 2016a. Distinct persistence barriers in two types of ENSO. *Geophys Res Lett*, 43: 10973–10979
- Ren H-L, Zuo J, Jin F-F, et al. 2016b. ENSO and annual cycle interaction: the combination mode representation in CMIP5 models. *Climate Dyn*, 46(11–12): 3753–3765
- Ren H-L, Jin F-F, Song L, et al. 2017a. Prediction of primary climate variability modes in Beijing Climate Center. *J Meteor Res*, 31(1): 204–223

- 
- Ren H-L, Wang R, Zhai P, et al. 2017b. 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 Meteor Res*, 31(2): 278-294
- Ren H-L, Lu B, Wan J, et al. 2018. Identification standard for ENSO events and its application to climate monitoring and prediction. *J Meteor Res*, 32(6): 923 - 936
- Ren H-L, Scaife A A, Dunstone N, et al. 2019a. Seasonal predictability of winter ENSO types in operational dynamical model predictions. *Climate Dyn*, 52(7-8): 3869 - 3890
- Ren H-L, Wu Y, Bao Q, et al. 2019b. China multi-model ensemble prediction system version 1.0 (CMMEv1.0) and its application to flood-season prediction in 2018. *J. Meteor. Res.*, 31(3): 542 - 554
- Ren H-L, Zuo J, Deng Y. 2019c. Statistical predictability of Niño indices for two types of ENSO. *Climate Dyn*, 52(9 - 10): 5361 - 5382
- Rong X, Zhang R, Li T, et al. 2011. Upscale feedback of high-frequency winds to ENSO. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(657): 894-907
- Su J, Zhang R, Li T, et al. 2010. Causes of the El Niño and La Niña amplitude asymmetry in the equatorial Eastern Pacific. *J Climate*, 23(3): 605-617
- Su J, Li T, Zhang R. 2014. The initiation and developing mechanisms of central Pacific El Niños. *J Climate*, 27(12): 4473-4485
- Suarez M J, Schopf P S. 1988. A delayed action oscillator for ENSO. *J Atmos Sci*, 45(21): 3283-3287
- Sullivan A, Luo J-J, Hirst A C, et al. 2016. Robust contribution of decadal anomalies to the frequency of central-Pacific El Niño. *Sci Rep*, 6: 38540
- Tang Y, Zhang R-H, Liu T, et al. 2018. Progress in ENSO prediction and predictability study. *Natl Sci Rev*, 5(6): 826-839
- Tao W, Huang G, Hu K, et al. 2015. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections to the Indian Ocean Basin Mode and their relationship under global warming in CMIP5 models. *Int J Climatol*, 35(3): 391-407
- Tian B, Ren H-L, Jin F-F, et al. 2019. Diagnosing the representation and causes of the ENSO persistence barrier in CMIP5 simulations. *Climate Dyn*, 53(3 - 4): 2147 - 2160
- Wang C, Wang X. 2013. Classifying El Niño Modoki I and II by different impacts on rainfall in southern China and typhoon tracks. *J Climate*, 26(4): 1322 - 1338
- Wang C. 2018. A review of ENSO theories. *Natl Sci Rev*, 5: 35-47
- Wang C. 2019. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective. *Climate Dyn*, 53: 5119-5136
- Wang L-C, Wu C-R. 2013. Contrasting the flow patterns in the equatorial Pacific between two types of El Niño. *Atmos-Ocean*, 51(1): 60-74
- Wang L, Yu J-Y, Paek H. 2017. Enhanced biennial variability in the Pacific due to Atlantic capacitor effect. *Nat Commun*, 8: 14887
- Wang M, Guan Z, Jin D. 2018. Two new sea surface temperature anomalies indices for



- 
- capturing the eastern and central equatorial Pacific type El Niño–Southern Oscillation events during boreal summer. *Int J Climatol*, 38(11): 4066–4076
- Wang Q, Li J, Jin F-F, et al. 2019. Tropical cyclones act to intensify El Niño. *Nat Commun*, 10: 3793
- Wang R, Ren H-L. 2017. The linkage between two ENSO types/modes and the interdecadal changes of ENSO around the year 2000. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 10(2): 168–174
- Wang T, Guo D, Gao Y, et al. 2018. Modulation of ENSO evolution by strong tropical volcanic eruptions. *Climate Dyn*, 51(7): 2433–2453
- Wang X, Wang D, and Zhou W. 2009. Decadal variability of twentieth-century El Niño and La Niña occurrence from observations and IPCC AR4 coupled models. *Geophys Res Lett*, 36: L11701
- Wang X, Wang C, Zhou W, et al. 2010. Teleconnected influence of North Atlantic Sea surface temperature on the El Niño onset. *Climate Dyn*, 37(3–4): 663–676
- Weng H, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dyn*, 29(2–3): 113–129
- Wu B, Zhou T, Li T. 2009. Contrast of rainfall–SST relationships in the western North Pacific between the ENSO–developing and ENSO–decaying summers. *J Climate*, 22(16): 4398–4405
- Wu L, He F, Liu Z, et al. 2007. Atmospheric teleconnections of tropical Atlantic variability: interhemispheric, tropical–extratropical, and cross-basin interactions. *J Climate*, 20(5): 856–870
- Wu Z, Lin H. 2012. Interdecadal Variability of the ENSO–North Atlantic Oscillation connection in boreal summer. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138: 1668–1675
- Wu Z, Chen S, He J, et al. 2014. Quantifications of the two “flavours” of El Niño using upper–ocean heat content. *Atmos–Ocean*, 52(4): 351–362
- Wyrtki K. 1975. El Niño–the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr*, 5(4): 572–584
- Xie F, Li J, Sun C, et al. 2016. A connection from Arctic stratospheric ozone to El Niño–Southern oscillation. *Environ Res Lett*, 11(12): 124026
- Xie R, Huang F, Ren H-L. 2013. Subtropical air–sea interaction and development of central Pacific El Niño. *J Ocean Univ China*, 12(2): 260–271
- Xie R, Yang Y. 2014. Revisiting the latitude fluctuations of the eastern Pacific ITCZ during the central Pacific El Niño. *Geophys Res Lett*, 41(22): 7770–7776
- Xie R, Huang F, Jin F-F, et al. 2015. The impact of basic state on quasi-biennial periodicity of central Pacific ENSO over the past decade. *Theor Appl Climatol*, 120(1): 55–67
- Xie R, Jin F-F. 2018. Two leading ENSO Modes and El Niño types in the Zebiak–Cane Model. *J Climate*, 31(5): 1943–1962
- Xie S-P, Peng Q, Kamae Y, et al. 2018. Eastern Pacific ITCZ dipole and ENSO diversity. *J Climate*, 31(11): 4449–4462
- Xu K, Zhu C, He J. 2012. Linkage between the dominant modes in Pacific subsurface

- 
- ocean temperature and the two type ENSO events. *Chin Sci Bull*, 57(26): 3491–3496
- Xu K, Huang R X, Wang W, et al. 2017. Thermocline fluctuations in the equatorial Pacific related to the two types of El Niño events. *J Climate*, 30(17): 6611–6627
- Xu K, Wang W, Liu B, et al. 2019. Weakening of the El Niño amplitude since the late 1990s and its link to decadal change in the North Pacific climate. *Int J Climatol*, 39(10): 4125–4138
- Yang S, Jiang X. 2014. Prediction of eastern and central Pacific ENSO events and their impacts on East Asian climate by the NCEP climate forecast system. *J Climate*, 27:4451–4472
- Yeh S-W, Kug J-S, An S-I. 2014. Recent progress on two types of El Niño: Observations, dynamics, and future changes. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 50(1): 69–81
- Yu W, Xiang B, Liu L, et al. 2005. Understanding the origins of interannual thermocline variations in the tropical Indian Ocean. *Geophys Res Lett*, 32: L24706
- Zebiak S E, Cane M A. 1987. A model El Niño - Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 115(10): 2262–2278
- Zhang C, Luo J-J, Li S. 2019. Impacts of tropical Indian and Atlantic Ocean warming on the occurrence of the 2017/2018 La Niña. *Geophys Res Lett*, 46(6): 3435–3445
- Zhang R, Chao J. 1992. Numerical experiments on the tropical air-sea interaction waves. *Acta Meteor Sinica*, 6(2): 148–158
- Zhang R, Chao J. 1993. Unstable tropical air-sea interaction waves and their physical mechanisms. *Adv Atmos Sci*, 10(1): 61–70
- Zhang R-H, Busalacchi A J, Wang X, et al. 2009. Role of ocean biology-induced climate feedback in the modulation of El Niño-Southern Oscillation. *Geophys Res Lett*, 36: L03608
- Zhang R-H, Chen D, Wang G. 2011. Using satellite ocean color data to derive an empirical model for the penetration depth of solar radiation ( $H_p$ ) in the tropical Pacific Ocean. *J Atmos Ocean Technol*, 28(7): 944–965
- Zhang R-H. 2015a. An ocean-biology-induced negative feedback on ENSO as derived from a hybrid coupled model of the tropical Pacific. *J Geophys Res: Oceans*, 120(12): 8052–8076
- Zhang R-H. 2015b. Structure and effect of ocean biology-induced heating (OBH) in the tropical Pacific, diagnosed from a hybrid coupled model simulation. *Climate Dyn*, 44(3): 695–715
- Zhang R-H. 2015c. A hybrid coupled model for the Pacific ocean-atmosphere system. Part I: Description and basic performance. *Adv Atmos Sci*, 32(3): 301–318
- Zhang R-H, Gao C, Kang X, et al. 2015. ENSO modulations due to interannual variability of freshwater forcing and ocean biology-induced heating in the tropical Pacific. *Sci Rep*, 5: 18506
- Zhang W, Li J, Jin F-F. 2009: Spatial and temporal features of ENSO meridional scales. *Geophys Res Lett*, 36: L15605
- Zhang W, Jin F-F, Ren H-L, et al. 2012. Differences in teleconnection over the North

- 
- Pacific and rainfall shift over the USA associated with two types of El Niño during boreal autumn. *J Meteor Soc Japan*, 90(4): 535–552
- Zhang W, Li H, Jin F-F, et al. 2015a. The annual-cycle modulation of meridional asymmetry in ENSOs atmospheric response and its dependence on ENSO zonal structure. *J Climate*, 28(14): 5795–5812
- Zhang W, Wang Y, Jin F-F, et al. 2015b. Impact of different El Niño types on the El Niño/IOD relationship. *Geophys Res Lett*, 42(20): 8570–8576
- Zheng F, Zhu J, Zhang R-H, et al. 2006. Ensemble hindcasts of SST anomalies in the tropical Pacific using an intermediate coupled model. *Geophys Res Lett*, 33: L19604
- Zheng F, Zhu J, Zhang R-H. 2007. Impact of altimetry data on ENSO ensemble initializations and predictions. *Geophys Res Lett*, 34: L13611
- Zheng F, Zhu J. 2010. Coupled assimilation for an intermediated coupled ENSO prediction model. *Ocean Dyn*, 60: 1061–1073
- 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. *Dyn Atmos Oceans*, 57: 45–57
- Zheng F, Fang X-H, Yu J-Y, et al. 2014. Asymmetry of the Bjerknes positive feedback between the two types of El Niño. *Geophys Res Lett*, 41(21): 7651–7657
- Zheng F, Zhang R-H. 2015a. Interannually varying salinity effects on ENSO in the tropical Pacific: a diagnostic analysis from Argo. *Ocean Dyn*, 65(5): 691–705
- Zheng F, Zhu J. 2015b. Roles of initial ocean surface and subsurface states on successfully predicting 2006–2007 El Niño with an intermediate coupled model. *Ocean Sci*, 11: 187–194
- Zheng F, Zhu J. 2016. Improved ensemble-mean forecasting of ENSO events by a zero-mean stochastic error model of an intermediate coupled model. *Climate Dyn*, 47(12): 3901–3915
- Zheng F, Li J, Ding R. 2017. Influence of the preceding austral summer Southern Hemisphere annular mode on the amplitude of ENSO decay. *Adv Atmos Sci*, 34(11): 1358–1379
- Zheng X-T, Xie S-P, Lv L-H, et al. 2016. Intermodel Uncertainty in ENSO Amplitude Change Tied to Pacific Ocean Warming Pattern. *J Climate*, 29(20): 7265–7279
- Zhong W, Zheng X-T, Cai W. 2017. A decadal tropical Pacific condition unfavorable to central Pacific El Niño. *Geophys Res Lett*, 44(15): 7919–7926
- Zhou G-Q, and Zeng Q-C. 2001. Predictions of ENSO with a coupled Atmosphere–Ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(4): 587–603
- Zhou Z-Q, Xie S-P, Zheng X-T, et al. 2014. Global warming-induced changes in El Niño teleconnections over the North Pacific and North America. *J Climate*, 27(24): 9050–9064