

近30年ENSO研究进展回顾

任福民¹ 袁媛¹ 孙丞虎¹ 曹璐²

(1 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 江苏省气象台, 南京 210008)

摘要: 作为年际气候变化中的最强信号, ENSO现象很早以来就备受关注。ENSO不仅是造成全球气候异常的一个重要原因, 也是导致亚洲季风异常和我国旱涝发生的关键因素。回顾了近30年国内外ENSO研究的最新进展, 并重点从ENSO动力学理论、ENSO预测方法、ENSO的年代际变化特征、ENSO的分类、ENSO的指标、ENSO的气候影响和ENSO的业务现状等七个部分进行了回顾和总结, 尤其对最近几年关于不同分布型ENSO事件的研究进展做了比较详细的归纳总结。此外, 文章还讨论了在ENSO不同分布型的监测指标设定及气候影响等方面需要进一步深入研究的问题。

关键词: 近30年, ENSO, 研究进展, 回顾

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.03.002

Review of Progress of ENSO Studies in the Past Three Decades

Ren Fumin¹, Yuan Yuan¹, Sun Chenghu¹, Cao Lu²

(1 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract: As the strongest signal of the interannual climate variability, the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) has attracted great attention. ENSO not only plays an important role in the droughts and floods over China, and in the anomaly of Asian monsoon, but also exerts a great impact on the global climate anomalies. The paper provides a review of ENSO research in the past 30 years, mainly in the following seven aspects: ENSO dynamical theory, ENSO prediction methods, interdecadal variations of ENSO, classification of ENSO type, monitoring indices of ENSO, the possible climate impacts by ENSO and the status of current ENSO operations. Recent studies of different distribution types of ENSO have also been summarized in great detail. Moreover, the paper discussed potential further studies in several topics, such as the monitoring indices of different distribution types of ENSO and their climate impacts.

Key Words: past three decades, ENSO, progress, review

1 引言

发生在热带太平洋地区的ENSO现象是年际气候变化中的最强信号, 它以2~7年的周期不断循环, 并在暖位相和冷位相分别表现为El Niño和La Niña事件。El Niño和La Niña事件的出现不仅直接造成热带太平洋地区的天气气候出现异常, 还会以遥相关的方式间接地影响热带太平洋以外地区乃至全球的天气气候。鉴于ENSO的重要性, 它的研究工作始终深受关注和重视, 成果亦不断涌现。

本文试图对近30年来国内外在ENSO方面的研究进展给出总结, 包括ENSO动力学理论、ENSO预测方法、ENSO的年代际变化特征、ENSO的分类、ENSO

的指标、ENSO的气候影响和ENSO的业务现状等七个部分。

2 ENSO动力学理论

自Bjerknes发表ENSO是热带大气和海洋相互作用这一著名观点后, El Niño的理论研究越来越受到重视, 特别是近20年关于El Niño形成的理论与推测不断涌现。关于El Niño形成的动力学机理主要包括: 信风张弛、ENSO循环、延迟振子、纬向异常风应力、季节内振荡、强寒潮、印-太海气齿轮式耦合等。

20世纪70年代提出的海洋学模型^[1]比较完整地描写了El Niño现象在赤道附近地区的海洋现象及演变。模型强调了前期信风增强而形成的能量积累的作用。通常情况下, 赤道太平洋洋面上空盛行偏东信风。在赤道南北两侧东南信风和东北信风的驱动下, 赤道太平洋表层海水自东向西流动, 形成表层洋流。这股洋流将太平洋表层暖的海水输送到西太平洋堆积, 使得西太平洋水位不断上升, 热量也不断积蓄^[2]。在信

收稿日期: 2011年11月11日; 修回日期: 2012年1月11日

第一作者: 任福民(1968—), Email: fmren@163.com

资助信息: 2008年国家标准项目“厄尔尼诺、拉尼娜事件定义”; 国家自然科学基金(41005038); 公益性行业专项(GYHY20090601)

风明显减弱的情况下海洋位能释放，表层暖水向东回流，东太平洋海面升高，海面增暖，斜温层增厚，出现El Niño现象^[3]。而当信风异常偏强时，赤道太平洋表层海水自东向西流动的流量将加强。由此将导致西太平洋堆积更大量的暖海水，并导致La Niña现象的发生。

Wyrtki的El Niño模型虽然指出了信风异常的重要作用，但并没有深入考虑大尺度海气相互作用。当考虑大尺度海气相互作用时，ENSO可以认为是海气耦合系统中的一种振荡，它可以通过自身物理过程的变化和相互反馈而激发和驱动^[3]。为了揭露ENSO循环，各种海气耦合模式相继诞生，并取得了很好的结果^[4, 5]。海气耦合过程中，热带海洋在受到风应力强迫的同时，除了引起海洋中各要素场的变化外，还将通过海洋不稳定过程激发海洋Kelvin波和Rossby波。这些波动在ENSO的形成、发展过程中起到了重要作用。黄荣辉等^[6]的研究表明，在El Niño发展阶段，热带西太平洋赤道以北为气旋式环流异常，而在El Niño盛期时为反气旋式环流异常。他们的研究指出，在El Niño发展阶段前，西太平洋暖池变暖造成了此气旋性环流异常，与此相联系，在印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生西风异常。当El Niño事件发展到成熟阶段，西太平洋暖池变冷造成了此反气旋性环流异常，从而使印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生东风异常。由此形成的赤道附近的纬向风异常通过激发出海洋中的赤道波系，对于El Niño事件的发展与衰减和La Niña事件的发生产生重要的动力作用。

李崇银^[3]用一个概念模型清楚地说明了ENSO循环的动力学机制。赤道西太平洋地区的SST一般都比较低，若因某些原因，一旦那里信风出现异常（减弱），便可以激发产生出异常的暖性Kelvin波，并向东传播；由于海气耦合相互作用，这种异常的暖性Kelvin波在东传过程中可得到较强发展，最终导致El Niño事件。而在暖性Kelvin波东传的同时，海气耦合相互作用还将激发产生一种向西传播的冷性Rossby波，它一方面可使西太平洋的SST降低，另一方面在西岸反射而成为冷性Kelvin波。若这时信风出现异常（增强），冷性Kelvin波将在西太平洋持续产生和东传，并通过海气耦合作用又激发产生暖性Rossby波，它同暖性Kelvin波在赤道东太平洋海岸反射后的暖性Rossby波一起传到赤道西太平洋，一方面使赤道西太平洋SST增加，另一方面它在西岸反射而成暖性Kelvin波，这又为下一次循环准备了条件。

基于以上这些理论，Jin^[7]建立了一个新的ENSO概念模型。该模型基于两个基础：一是由Bjerknes提出的将热带海洋大气相互作用的正反馈作为增长机

制，二是由Cane、Zebiak和Wyrtki提出的赤道热容量充放电效应作为位相转换机制。该模型将SST动力学和海洋适应动力学结合成一个耦合的大盆尺度的充电振子，该充电振子依靠纬向平均赤道海洋温跃层深度和赤道风应力之间的非平衡性得以实现。经过了广泛的相对耦合系数试验，该充电振子可分别具备自激或随机持续的功能。其周期稳定在3~5年。该充电振子清楚地表现了ENSO的慢变物理特性，并表现为一个无须明确延迟波的延迟振子。对于热带海洋大气的相互作用，上述充电振子模型可以直接从Cane和Zebiak模式的动力框架推导得出^[8]。在此基础上，Bejarano等^[9]进一步发展了该理论，指出温跃层反馈和纬向平流反馈分别代表以下两个过程：即由平均上升流形成的次表层海温距平垂直平流和由距平洋流引起的SST纬向平流，而正是这两个过程通过不同途径控制了主导耦合模，从而有效制约着ENSO的发展和位相转换。随后，Bejarano等^[10]深入探讨了与ENSO现象相关联的海洋大气主导耦合模，发现不同类型的主导耦合模——特别是准四年振荡和准两年振荡这两个最重要的耦合模的共存现象可以合理地解释观测到的ENSO行为。

与延迟振子理论不同，张人禾等^[11]所揭示的观测事实强调了首先出现在热带西太平洋的纬向风应力及其东传在维持ENSO循环中的重要作用。他们发现观测的大洋中西部纬向风应力异常出现在热带中东太平洋海温变化之前。随着西风应力异常不断加大且向东传播，此时赤道中东太平洋的海面温度不断升高；当西风应力异常达到最大且其最大中心东传到日期变更线附近时，赤道中东太平洋的海面温度达到最高。随着西风应力异常向东移，在其西边的热带西太平洋出现了东风应力异常。赤道西太平洋的东风异常出现在赤道中东太平洋海面温度达到最高值之前。随着东风应力异常的加强和向东移动，赤道中东太平洋的海面温度正异常不断减弱，直至海面温度正异常消失并出现海面温度负异常。进一步的研究^[11, 12]指出，热带西太平洋纬向风应力的变化及其东移与赤道东太平洋海面温度的变化存在着内在的动力学联系，并且纬向风应力东传时比其静止时所激发出的海洋Kelvin波有更大的强度。

虽然热带太平洋地区海气相互作用在ENSO的发生、发展和消亡中起着重要的作用，但一些研究也表明，热带太平洋区域以外海气系统同样对ENSO循环具有重要影响。李崇银等对季节内振荡与El Niño的关系研究发现，热带大气季节内振荡的年际变化同El Niño事件的发生有密切关系。在El Niño发生之前，

热带大气季节内振荡的动能异常增强；伴随El Niño的爆发，热带大气季节内振荡的动能迅速减小，而准定常系统的动能却急速增强。因此，当热带大气季节内振荡出现异常发展（年际异常）后，过剩的季节内振荡的扰动动能将被传送给准定常系统，使准定常系统强烈发展，在海气相互作用下激发产生El Niño事件^[2,3]。

另外，冬半年东亚冬季风的异常活跃（强寒潮频繁）也可能是导致El Niño事件发生的机制之一^[3]。东亚冬季风（寒潮）活动的异常活跃，可以通过行星波列不断将能量向东南方向频散到热带中、西太平洋地区，引起热带中、西太平洋地区偏东信风不断被削弱，并使得对流活动和降水增强，而大气对流活动的增强将激发强的30~60天季节内振荡，通过海气耦合相互作用激发El Niño的发生^[13]。黄荣辉等^[14, 15]也指出ENSO循环可能是亚洲季风区与环流区之间存在的低频振荡的产物，并指出赤道附近西风异常可能是ENSO发生的一个必要条件，而这种西风异常的产生与东亚季风区的西风异常向赤道的传播有关。

近几年，随着印度洋偶极子现象的发现^[16, 17]，印度洋海温与ENSO之间的相互作用也成为非常热门的话题；袁媛等^[18]指出，1970年代之前印度洋偶极子与太平洋ENSO事件具有较强的相互独立性，而1970年代之后两者相互联系、相互影响。同时还指出，偶极子不仅仅受到ENSO的影响，反过来也会影响ENSO的强度。吴国雄等^[19]早在1998年就指出，赤道印度洋和东太平洋海表温度年际变化之间存在着显著的正相关，并指出印度洋这种与ENSO相关联的变化，与ENSO之间存在内在的物理联系。它们之间的联系是由沿赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空Walker环流之间显著的“齿轮式”耦合造成的，并提出从大气环流的角度来说，印度洋地区季风环流的异常可能是ENSO事件形成的一种触发机制。孟文等^[20]从模拟分析角度进一步证实了这一发现，并指出太平洋或印度洋上的大气异常信号可以通过这种“齿轮式”耦合作为桥梁，影响另一地的海气相互作用。Kug等^[21, 22]近期的研究再次指出，作为厄尔尼诺的特征之一，印度洋海温的变暖对于ENSO将起到负反馈作用。这一负反馈作用对于强厄尔尼诺事件以及随后而来的拉尼娜事件尤其明显。

3 ENSO预测方法

正是由于ENSO对全球气候变化有着极大的影响，自20世纪80年代以来，各国科学家广泛开展ENSO预测研究。目前ENSO预测模型主要分为两类，即统计学模型和动力学模型^[23-25]。

自从Zebiak等^[26]首次使用简化海气耦合模式（ZC）

成功预测了1986/1987年的El Niño事件后，国内外的科研和业务单位相继投入了大量的人力和物力，开展各种不同复杂程度的海气耦合模式预测系统的研发工作，以满足各国业务单位对ENSO等季节—年际预测业务的需要^[27-31]。当前主要发达国家，如美国气候预测中心（CPC）、美国气候与环境国际研究中心（IRI）、欧洲中期天气预报中心（ECMWF）、日本气象厅（JMA）、日本全球变化Frontier研究所、澳大利亚气象局研究中心（BMRC）、中国国家气候中心（NCC）的ENSO预测系统均以复杂海（陆）气耦合模式系统为主^[32-39]，甚至开始尝试未来利用气候系统模式^[39, 40]进行跨季度—年际气候预测。

尽管不少国家已开始利用复杂气候模式发布未来12~24个月内的ENSO趋势预测产品，但在准确性上，没有一个国家的动力模式能预报出ENSO事件循环过程的每一细节^[41, 42]。从影响气候模式ENSO预测技巧的主要因素看，主要是由于模式本身不完善以及大气和海洋初始场存在不可避免的系统性、随机性等各种观测误差所引起的^[42-47]。如，Yan等^[48, 49]、Latif等^[23]分析了ENSO的可预报性问题，指出由于气候变化本身的非线性和不规则的特性以及大气的随机强迫，即较短时间内的ENSO预测同样存在着一定的不确定性。因此，对于ENSO预测也应该存在类似于在大气集合预报中对不确定性的考虑，恰当的估计和模拟出ENSO预测的初始不确定性和预报过程的不确定性，以弥补单一确定性预报的不足。由此，许多工作针对ENSO预报中（耦合的）初始扰动对ENSO集合预报的影响开展了研究。Moore等^[50]、Kleeman等^[51]直接应用了“最优扰动”（亦即Singular Vector）方法在一个ICM中，分析发现ENSO预报水平与样本离散度以及最慢衰减的增长模振幅有很强关系。Kirtman^[41]强调了ENSO预报应该是具有概率预报性质的，并应用LAF方法用6个样本在COLA模式中进行了集合后报试验。Cai等^[52]、Yang等^[53]分别在ZC模式和NSIPP（NASA季节到年际预报计划，NASA Seasonal to Interannual Prediction Project）CGCM两个耦合模式中检验了“Breeding”方法，分析了与ENSO变化相关的耦合增长模的空间分布。穆穆等^[54]用CNOP（条件非线性最优扰动，Conditional Nonlinear Optimal Perturbation）方法在ZC模式中研究预报时刻对预报结果有最大影响的初始误差，也可分析非线性模式的最不稳定的初始模态。这些结果的应用表明，采用集合预报的办法可以在一定程度上减少初值中的不确定性，提高ENSO预测的准确率。

综上，要进一步提高气候模式对ENSO的预测技巧，需要通过改进模式、提高观测资料质量或者采用

集合预报这一途径来逐步解决。在未来ENSO预测方式的选择上,总体将依赖具备复杂海(陆)气耦合能力的气候模式系统,并结合集合预报这一技术手段,这已成为国内外的共识。

在ENSO统计预测方法方面,常用方法主要有典型相关分析(Canonical Correlation Analysis,简称CCA)^[55,56]、奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis,简称SSA)^[57]、主振荡分析(Principal Oscillation Pattern analysis,简称POP)、线性反置模型^[58]、气候持续性模型^[59]、马尔科夫链^[60]、相似预报模型^[61]、滤波最优叠合模式^[62]、(复)经验正交函数分析、回归分析和神经网络等方法。在目前动力学方法发展还未完全成熟的情况下,ENSO统计预测方法仍将在相当长的时间内具有不可或缺的发展空间和重要的应用价值。

4 ENSO的年代际变化特征

王绍武等^[63]利用Niño 3区、Niño C区海表温度序列及两个SOI序列,同时考虑SST和SOI建立了1867—1998年季分辨率的ENSO指数序列。根据ENSO指数序列,并参考Wright的SOI指数及其他资料,确认了1867—1998年ENSO事件,共确定出32次暖事件(正SST、负SOI)及32次冷事件(负SST、正SOI)。对每次事件的强度分强、中、弱三等进行了评估。虽然1982/1983年暖事件的峰值最高,但从整个事件的平均强度来看,1997/1998年的暖事件则是130多年来最强的一次。另外,近20年是暖事件的多发期。

Cane^[64]回顾了ENSO气候变化研究并指出,在过去几年,人们对于ENSO的古气候记录知识迅速加深。ENSO循环在所有相关历史记录资料中都确实存在,可以追溯到13万年前。在全新世的早期和中期,ENSO循环表现为系统性偏弱,而且模式研究指出这一结论来源于北半球夏季近日点平均气候改变的一种结果——夏末和秋初减弱的振幅。来自珊瑚的数据显示在过去的1000年内ENSO循环的强度存在明显的年代际和更长时间尺度的变率;这意味着这可能是由于太阳辐射中包含了太阳和火山变率的缘故,并由Bjerknes反馈得到加强。一些证据表明,这一反馈在20世纪已经起了作用,而且一些模式结果也表明,在未来温室效应的情景下结果仍存在较大不确定性。用于未来气候预估的复杂大气环流模式在ENSO的未来演变方面表现出很大的不确定性。一些模式预估ENSO活动将更加频繁,而另一些模式则预估偏少,反映出高度不确定性的预估结论。

Yu等^[65]从持续性特征角度分析了ENSO春季障碍现象的年代际变化特征,1958—2001年ENSO事件赤道太平洋海温异常在中太平洋和东太平洋可视为两个

不同的过程:在赤道中太平洋,位相转换和持续性障碍总是发生在春季;在赤道东太平洋,位相转换和持续性障碍存在年代际变化,即持续性障碍在1976/1977年和1989/1990年发生了两次明显的突变,这主要是受赤道太平洋平均温跃层深度的变化的影响所致。

5 ENSO的分类

关于ENSO事件分布型的研究是近几年非常热门的话题,主要原因可能是2000年以来发生的El Niño事件基本都不同于传统的El Niño事件,最大海温正距平分布的区域不在传统定义ENSO事件的Niño 3区,而是向西移动到日界线附近,由此带来的气候影响也与传统ENSO事件的影响有着明显的差异,因此这一现象引起了科学家们广泛的关注。

然而事实上早期的研究已经注意到El Niño事件的发生过程包括两类,一类主要在太平洋东部(秘鲁沿岸)增暖再向西扩展,另一类则主要在赤道中太平洋出现大范围增暖并自西向东扩展^[66-68]。但直到最近几年,研究者才意识到在ENSO事件的发展过程中,受海表温度异常不同分布形态的影响,热带对流加热场的分布特征表现出显著的差异,由此提出应该依据海表温度异常的空间分布形态将El Niño分为不同分布型,来研究其发生机理及气候影响。他们将这些主要在赤道中太平洋增暖的El Niño事件称为日界线El Niño^[69]、El Niño Modoki^[70]、暖池El Niño^[71]或中部型El Niño^[72],而在太平洋东部特别是秘鲁沿岸增暖的El Niño事件相应被称为典型El Niño、冷舌El Niño或东部型El Niño。为便于理解,本文用中部型和东部型的命名方式来区分不同分布型的El Niño事件。统计发现,20世纪90年代以后发生的8次El Niño事件中,有5次都是中部型,而另外3次则兼有中部型和东部型的共同特征,Kug等^[71]称之为混合型El Niño。

东部型El Niño的海表温度异常中心主要分布在赤道东太平洋地区靠近南美沿岸,也即是通常所说的Niño 3区;这一类型El Niño的发生及发展演变受到整个热带太平洋温跃层、热容量及表面风变化的影响;反位相事件经常在El Niño事件结束后发生,因此它常被称为一次循环;东部型El Niño主要以年际变化为主,但也具有1976/1977年前后的年代际变化特征,表现为在这之前以2年周期为主,而之后以4年周期为主^[71,72]。

与之不同,中部型El Niño的海表温度正距平中心主要分布在赤道太平洋中部,也即是Niño 4区^[71,72],而赤道东太平洋和西太平洋海温相对较冷,从而使得整个赤道太平洋形成“-+ -”的海温分布型^[70];海温异常沿赤道传播的特征不明显,而主要在局地发展消亡^[72];中部型El Niño事件的发生及发展演变可能更多

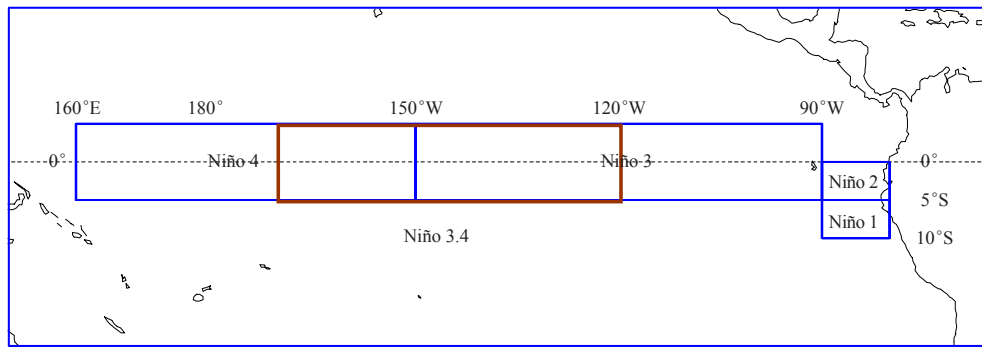


图1 ENSO监测关键区分布 (引自国家气候中心)

的基于大气外强迫^[72]或者纬向平流^[71, 73]等机制;反位相事件不常紧跟发生,因此不同于东部型El Niño被称为一次循环,它常被称为一次事件^[71, 72];中部型El Niño具有明显的年代际背景,并以2年的周期为主^[72, 74]。另外, Yeh等^[73]提出中部型El Niño事件在1990年代后发生的频率显著增加,这可能与全球气候变暖,尤其是赤道太平洋海温的年代际增暖有关。

6 ENSO的指标

ENSO事件研究的指数有多种,最常见的是ENSO监测关键区(图1)海表温度指数如Niño 1+2, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4和JMA指数(类似Niño 3指数,但关键区的南北范围为4°S—4°N)^[75],以及基于地表大气气压的南方涛动指数SOI。此外,许多研究还提出其他一些指数,如由6个变量经主成分分析得到的多变量ENSO指数(Multivariate ENSO Index (MEI))^[76]、代表Niño 1+2区与Niño 4区之间海表温度梯度的TNI[Trans-Niño Index (TNI)]^[77]指数和Niño综合区(Niño Z= Niño 1+2+3+4)海温指数^[78]等。近几年针对不同类型的ENSO事件,又发展一些新的监测指数如反映海表温度距平“+ -”分布型的假厄尔尼诺指数[El Niño Modoki index (EMI)]^[79]、分别反映东部型(EP)和中部型(CP)ENSO事件的海温指数^[72, 79]。为了对EP和CP型ENSO进行更有效地识别,曹璐等^[80]提出了一个指标组,即由Niño 3和Niño 4两个指数共同对ENSO事件进行判别。

关于EP和CP次表层海温指数, Yu等^[79]利用1958—2001年海洋同化资料100m以上在东太平洋(80°—90°W, 5°S—5°N)和中太平洋(160°E—150°W, 5°S—5°N)区域内的平均海温距平建立得到。分析发现上述次表层指数较之SST指数具有更强的独立性,并表现出更适合于识别EP和CP型ENSO特性。基于该指数识别的两类ENSO事件,强厄尔尼诺事件主要表现出EP型特征,而强拉尼娜事件则更趋向于CP型特征;对于弱的厄尔尼诺事件和强拉尼娜事件,则表现出相反的特性。对于20世纪两个强的厄

尔尼诺事件,1997/1998年事件表现为单一的EP型特征,而1982/1983年事件则兼有EP和CP型特征——由前期的弱CP型转换为后期的强EP型特征。

Hanley等^[81]研究指出,就现有的ENSO指数,对于究竟哪个指数能最好表征ENSO的演变特征这一问题,科学界尚未形成一致的看法。他们通过比较分析发现, Niño 4指数对于厄尔尼诺的反映相对较弱,而Niño 1+2指数对于拉尼娜的反映相对较强。指数的敏感性分析表明, ENSO指数的选取依赖于研究的ENSO位相。JMA指数对拉尼娜比所有其他指数来得敏感,而SOI、Niño 3.4和Niño 4指数对厄尔尼诺的敏感程度几乎一样并均强于JMA、Niño 1+2和Niño 3指数。

关于ENSO的定义,目前国际上并无统一的标准。Trenberth^[75]采用海洋—大气耦合关键区——Niño 3.4区(5°S—5°N, 120°—170°W)指数5个月滑动平均连续6个月 $\geq 0.4^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.4^{\circ}\text{C}$)定义为一次El Niño (La Niña)事件。王绍武等^[63]根据所研究问题的不同,选择了标准化的综合指数连续两季达到异常时分别定义为暖事件和冷事件。通常,国际气候业务中心采用如下一些标准:美国NOAA以Niño 3.4区SSTA的3个月滑动平均值连续5个月 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)定义为一次El Niño (La Niña)事件;日本气象厅采用5个月滑动平均月JMA指数连续6个月(其中必须包含10, 11和12月) $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)定义为一次El Niño (La Niña)事件;中国气象局国家气候中心依据Niño Z海温距平指数 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)至少持续6个月(过程中间可有一个月未达标准)则定义为一次El Niño (La Niña)事件,如若该区指数 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\leq -0.5^{\circ}\text{C}$)持续5个月,且5个月的指数之和 $\geq 4.0^{\circ}\text{C}$ ($\leq -4.0^{\circ}\text{C}$)时,也定义为一次El Niño (La Niña)事件。

7 ENSO的气候影响

从近30年的研究成果看, El Niño对全球天气气候的影响主要表现在:南美沿岸国家异常多雨,巴西东北部、中美洲、印度尼西亚、澳大利亚东部及周边国

家出现干旱，非洲东南部干旱而东非多雨，加拿大西部和美国北部暖冬，美国南部冬季潮湿多雨，西北太平洋和北大西洋热带风暴减少，以及东北亚（包括中国东北、日本北部和朝鲜等地）夏季易出现低温^[2]。龚道溢等^[82]对近百年来ENSO对全球陆地降水的影响研究表明：在El Niño年，全球陆地降水显著减少，而在La Niña年全球陆地降水则显著增加。

我国位于东亚季风区，东亚夏季风和冬季风的异常直接造成了我国气候的异常，ENSO正是通过大气环流以“遥相关”的形式影响到东亚季风系统的每个成员，并由此间接地影响我国的气候^[2]。ENSO被认为是影响东亚季风年际异常的关键因子^[83-86]。研究表明，在El Niño年，东亚夏季风减弱^[87]，我国夏季主要季风雨带偏南，江淮流域多雨的可能性较大，而北方地区特别是我国华北到河套一带常出现少雨和干旱^[88, 89]。在El Niño年的秋冬季，我国北方大部分地区降水比常年偏少，南方大部分地区降水比常年偏多^[90]。另外，在El Niño年东亚冬季风偏弱^[3, 91]，我国常出现暖冬冷夏，特别是我国东北地区由于夏季温度偏低，出现低温冷害的可能性较大^[92]。

造成这些影响的原因是：当赤道东太平洋海温异常升高时，其上空的对流活动变得活跃，导致这一地区降水增多，南美沿岸国家也因此异常多雨。同时，对流区的东移又使得西太平洋地区降水大大减少，从而使得印度尼西亚、澳大利亚东部及周边国家出现干旱。通过大气环流的作用，El Niño将热带地区大气和海洋的异常信号传给了热带其他地区及中高纬地区，从而对全球气候带来不同程度的影响^[2]。

然而进一步的研究发现，当中部型El Niño发生时，由于赤道太平洋海温异常分布的不同，对流活跃区较东部型El Niño偏西，在赤道太平洋上空地区可能会形成两个异常的Walker环流圈，从而对南美、北美西海岸，甚至日本和新西兰气候的影响与东部型El Niño的影响可能完全相反^[69, 70]。由于海温偏高，赤道太平洋中部为相对偏湿的区域，由此会在西北太平洋上空对流层中层激发正位相的PJ（Pacific-Japan）波列，在东北太平洋—北美地区上空的对流层中层激发正位相的夏季PNA（Pacific-North American）型，从而导致西北太平洋夏季风偏强，东亚夏季风偏弱^[74]，而在东部型El Niño年东亚夏季风却是偏强的。中部型El Niño还会导致美国西部冬季经常出现北干南湿的“跷跷板”式气候分布特征，而当东部型El Niño发生时美国西部大部地区冬季都以偏湿的气候特征为主。另外，与东亚冬季风相联系的反气旋在东部型El Niño年一般出现在菲律宾地区，而当中部型El Niño发生

时，此反气旋会西移到我国南海地区，由此而导致东亚南部完全相反的降水异常分布特征^[93-95]。最新的研究表明，在东部型El Niño次年的春季和夏季，我国华南降水偏多，而在中部型El Niño次年的春季和夏季，我国华南的降水则会偏少^[96, 97]。事实上，这种特征不仅仅表现在我国华南，主要出现在东亚东南部，而且从两类分布型El Niño的当年夏季到次年夏季都有明显差异^[98, 99]。

8 ENSO的业务现状

世界气象组织（WMO）自2006年以来根据赤道太平洋海温的发展演变状况准定期发布ENSO的最新报告（El Niño/La Niña Update）。该报告由WMO与美国气候和社会国际研究院（the International Research Institute for Climate and Society of USA, IRI）共同协作完成，贡献者包括相关国家的气候业务中心或研究机构。在ENSO业务方面，主要的气候业务中心或研究机构如下：

美国国家海洋大气局气候预测中心（NOAA/CPC），其网站实时提供包含反映大气和海洋异常状况的十分丰富的ENSO监测诊断产品，并有多种统计与动力模式的ENSO预测结果，以及专家讨论会商结论。美国气候和社会国际研究院（IRI）提供以下ENSO产品：ENSO展望简讯、ENSO技术分析最新报告、多种形式的ENSO预测产品（概率预报、预测集合）。澳大利亚气象局（BoM）实时提供翔实的ENSO监测诊断产品，同时在ENSO预测业务方面有模式集合预测系统（POAMA）专门的产品。

在亚洲，中国国家气候中心（CMA/NCC）提供较全面的ENSO监测诊断产品，ENSO预测产品来源于两个耦合动力模式和四个统计模式。日本气象厅（JMA）制作有专门的ENSO监测诊断产品，其ENSO预测产品主要来源于其海气耦合模式。韩国气象局（KMA）也提供实时的ENSO监测预测业务。

国际厄尔尼诺研究中心（CIIFEN）2003年1月成立于厄瓜多尔，隶属于WMO。该中心致力于减少ENSO事件对拉丁美洲临近太平洋地区带来的气候和经济社会影响，其网站主要提供西班牙语的ENSO监测预测及气候趋势预测产品，且主要面向拉丁美洲临近太平洋的国家和地区。

9 结束语

本文从五个方面对近30年来国内外在ENSO研究方面的最新进展给出总结，以往研究已经取得了丰硕的成果，特别是在ENSO动力学及预测理论方面更加显著。现有的研究不仅将ENSO循环看成是热带太平洋区域海气相互作用问题的研究，而且也开始关注

到热带印度洋通过大气桥与ENSO循环之间的相互作用。但是, ENSO循环不仅仅是一个热带问题, 对于热带以外区域海气系统对ENSO循环影响的机理方面还缺乏更深入的认识。因此, ENSO循环与热带外系统特别是整个亚澳季风系统之间的相互作用将可能成为未来一个重要的研究课题。此外, 对于ENSO的不同类型及其有效表征指标、以及ENSO事件对全球特别是我国天气气候的影响机理等科学问题也将备受关注。

致谢: 初审和终审几位专家对本文存在的问题提出了宝贵的修改意见, 对本文的质量提高起到了重要作用。作者在此深表谢意!

参考文献

- [1] Wyrski K. El Niño—the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5: 572-584.
- [2] 翟盘茂, 李晓燕, 任福民. 厄尔尼诺. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 2000.
- [4] McCreary J P. A model of tropical ocean-atmosphere interaction. *Mon Wea Rev*, 1983, 111: 370-387.
- [5] Cane M A, Zebiak S E, Dolan S C. Experimental forecasts of El Niño. *Nature*, 1986, 321: 827-832.
- [6] 黄荣辉, 张人禾, 严邦良. 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*, 2001, 31: 697-704.
- [7] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: A Stripped-Down Coupled Model. *Journal of the Atmospheric Science*, 1997, 54: 811-829.
- [8] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A Stripped-Down Coupled Model. *Journal of the Atmospheric Science*, 1997, 54: 830-847.
- [9] Bejarano L, Jin F F. Collective role of thermocline and zonal advective feedbacks in the ENSO mode. *Journal of Climate*, 2001, 14: 3421-3432.
- [10] Bejarano L, Jin F F. Coexistence of equatorial coupled modes of ENSO. *Journal of Climate*, 2007, 21: 3051-3067.
- [11] 张人禾, 黄荣辉. El Niño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*, 1998, 22: 597-609.
- [12] 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. El Niño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*, 2001, 25: 160-172.
- [13] Li C Y. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño Events. *Adv Atmos Sci*, 1990, 7: 36-46.
- [14] 黄荣辉, 傅云飞, 臧晓云. 亚洲季风与ENSO循环相互作用. *气候与环境研究*, 1996, 1: 38-54.
- [15] 黄荣辉, 吴仪芳. 关于ENSO循环动力学的研究. // 海洋环流研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [16] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401: 360-363.
- [17] Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, 1999, 401: 356-360.
- [18] 袁媛, 李崇银. 热带印度洋偶极子与ENSO事件关系的年代际变化. *科学通报*, 2008, 53: 1429-1436.
- [19] 吴国雄, 孟文. 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*, 1998, 22: 470-480.
- [20] 孟文, 吴国雄. 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*, 2000, 24: 15-25.
- [21] Kug J S, Kang I S. Interactive feedback between ENSO and the Indian Ocean. *Journal of Climate*, 2006, 19: 1784-1801.
- [22] Kug J S, Kirtman B P, Kang I S. Interactive feedback between ENSO and the Indian Ocean in an interactive ensemble coupled model. *Journal of Climate*, 2006, 19: 6371-6381.
- [23] Latif M, Anderson D, Barnett T, et al. A review of the predictability and prediction of ENSO. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14375-14393.
- [24] 张人禾, 周广庆, 巢纪平. ENSO动力学与预测. *大气科学*, 2003, 27(4): 674-688.
- [25] 郑飞. ENSO集合预报研究. 北京: 中国科学院研究生院大气物理研究所, 2007.
- [26] Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 2262-2278.
- [27] 周广庆, 李崇银. 西太平洋暖池次表层海温异常与炭关系的模拟结果. *气候与环境研究*, 1999, 4: 346-352.
- [28] Mason S J, Goddard L, Graham N E, et al. The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event. *Bull Amer Met Soc*, 1999, 80: 1853-1873.
- [29] Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to interannual prediction (DEMETER). *Bull Amer Met Soc*, 2004, 85: 853-872.
- [30] Alves O, Balmaseda M A, Anderson D, Stockdale T. Sensitivity of dynamical seasonal forecasts to ocean initial conditions. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2004, 130: 647-667.
- [31] 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展. *气象学报*, 2004, 62(5): 598-612.
- [32] Saha S, Nadiga C, Thiaw J, et al. The NCEP climate forecast system. *Journal of Climate*, 2006, 19: 3483-3517.
- [33] Anderson D L T, et al. Development of the ECMWF seasonal forecast system 3. ECMWF Tech Memo 503, Eur Cent For Medium Range Weather Forecasts, 2006.
- [34] Molteni F, et al. ECMWF seasonal forecast system 3. CLIVAR Exch, 2007, 43: 7-9.
- [35] Ishikawa I, Tsujino H, Hirabara M, et al. Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) manual. Technical Reports of the Meteorological Research Institute, 2005, 47 (in Japanese).
- [36] Mason S J, Goddard L, Graham N E, et al. The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event. *Bull Amer Met Soc*, 1999, 80: 1853-1873.
- [37] Wang G, Kleeman R, Smith N, et al. The BMRC coupled general circulation model ENSO forecast system. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 975-991.
- [38] Luo J J, Masson S, Behera S, et al. Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts. *J Climate*, 2005, 18: 4474-4497.
- [39] 吴统文, 等. 国家气候中心气候系统模式研发进展报告. 北京: 国家气候中心, 2009.
- [40] Kirtman B P, Min D. Multimodel ensemble ENSO prediction with CCSM and CFS. *Mon Wea Rev* 2009, 137: 2908-2930.
- [41] Kirtman P B. The COLA anomaly coupled model: Ensemble ENSO prediction. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 2324-2341.
- [42] Jin E K, James L K, Wang B, et al. Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. *Climate Dyn*, 2008, 31: 647-664.
- [43] Goswami B N, Shukla J. Predictability of a coupled ocean atmosphere model. *J Climate*, 1991, 4: 3-22.
- [44] Chen D, Zebiak S E, Cane M A. Initialization and predictability of a coupled ENSO forecast model. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 773-788.
- [45] Chen D, Cane M A, Kaplan A, et al. Predictability of El Niño in the past 148 years. *Nature*, 2004, 428: 733-736.
- [46] Moore A M, Kleeman R. The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO. *Quart J Roy Met Soc*, 1996, 122: 1405-1446.
- [47] Moore A M, Zavala-Garay J, Tang Y, et al. Optimal forcing patterns for coupled models of ENSO. *J Climate*, 2006, 19: 4683-4699.
- [48] Yan X, Cane M A, Zebiak S E. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part I: Optimal growth in seasonal background and ENSO cycles. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 2043-2056.
- [49] Yan X, Cane M A, Zebiak S E, et al. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part II: Optimal growth and forecast skill. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 2057-2073.

- [50] Moore A M, Kleeman R. Skill assessment for ENSO using ensemble prediction. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1998, 124: 557-584.
- [51] Kleeman R, Moore A M. A new method for determining the reliability of dynamical ENSO predictions. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 694-705.
- [52] Cai M, Kalnay E, Toth Z. Bred vectors of the Zebiak-Cane model and their application to ENSO predictions. *J Climate*, 2003, 16: 40-55.
- [53] Yang S C, Cai M, Kalnay E, et al. ENSO bred vectors in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *J Climate*, 2006, 19: 1422-1436.
- [54] 穆穆, 段晚锁. 条件非线性最优扰动及其在天气和气候可预报性研究中的应用. *科学通报*, 2005, 50: 2695-2701.
- [55] Barnston A G, Ropelewski C F. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis. *J Climate*, 1992, 5: 1316-1345.
- [56] 江志红, 丁裕国, 周琴芳. 用于ENSO预测的一种广义典型混合回归模式及其预报试验. *热带气象学报*, 1999, 15: 322-329.
- [57] 丁裕国, 江志红, 朱艳峰. Niño海区SSTA短期气候预测模型试验. *热带气象学报*, 1998, 14(4): 289-296.
- [58] Penland C, Magorian T. Prediction of Niño 3 sea surface temperatures using linear inverse modeling. *J Climate*, 1993, 6: 1067-1076.
- [59] Knaff J A, Landsea C W. An El Niño Southern Oscillation climatology and persistence (CLIPER) forecasting scheme. *Weather Forecast*, 1997, 12: 633-652.
- [60] Xue Y, Leetmaa A, Ji M. ENSO prediction with Markov models: The impact of sea level. *J Climate*, 2000, 13: 849-871.
- [61] 任福民, 周琴芳. 赤道中东太平洋海温相似预报研究. *气象学报*, 2001, 59(1): 49-58.
- [62] 任福民, 郭艳君, 周琴芳. ENSO预测的滤波最优叠合模式研究. ENSO监测和预测研究. 北京: 气象出版社, 1999.
- [63] 王绍武, 龚道溢. 近百来的ENSO事件及其强度. *气象*, 1999, 25(1): 9-14.
- [64] Cane M A. The evolution of El Niño, past and future. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230: 227-240.
- [65] Yu J Y, Kao H Y. Decadal changes of ENSO persistence barrier in SST and ocean heat content indices: 1958-2001. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112. doi: 10.1029/2006JD007654.
- [66] Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 1983, 222: 1195-1202.
- [67] Fu C B, Diaz H, Fletcher J. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with the warm episodes of the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 1986, 114: 1716-1738.
- [68] Wang B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J Climate*, 1995, 8: 267-285.
- [69] Larkin N K, Harrison D E. On the definition of El Niño and associated seasonal average U.S. weather anomalies. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L13705. doi:10.1029/2005GL022738.
- [70] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J Geophys Res*, 2007, 112, C11007. doi: 10.1029/2006JC003798.
- [71] Kug J S, Jin F F, An S I. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J Clim*, 2009, 22: 1499-1515.
- [72] Kao H Y, Yu J Y. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *J Clim*, 2009, 22: 615-632.
- [73] Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. El Niño in a changing climate. *Nature*, 2009, 461: 511-514.
- [74] Weng H, Ashok K, Behera S K, et al. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer. *Climate Dynamics*, 2007, 29: 113-129.
- [75] Trenberth K E. The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 2771-2777.
- [76] Wolter K, Timlin M S. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index: Proc of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor, Univ of Oklahoma, 1993.
- [77] Trenberth K E, Stepaniak D P. Indices of El Niño evolution. *J Clim*, 2001, 14: 1697-1701.
- [78] 李晓燕, 翟盘茂. ENSO事件指数与指标研究. *气象学报*, 2000, 58(1): 102-109.
- [79] Yu J Y, Kao H Y, Lee T, et al. Subsurface ocean temperature indices for Central-Pacific and Eastern-Pacific types of El Niño and La Niña events. *Theor Appl Climatol*, 2011, 103: 337-344.
- [80] 曹璐, 孙丞虎, 任福民, 等. 一种综合监测两类不同分布类型 ENSO事件指标的研究. *热带气象学报*, 2012, 待发表.
- [81] Hanley D E, Bourassa M A, O'brien J J, et al. A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *Journal of Climate*, 2003, 16(8): 1249-1258.
- [82] 龚道溢, 王绍武. 近百年ENSO 对全球陆地及中国降水的影响. *科学通报*, 1999, 44: 315-320.
- [83] Zhang R, Sumi A, Kimoto M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16: 229-241.
- [84] Chang C P, Zhang Y, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J Climate*, 2000, 13: 4310-4325.
- [85] Zhou W, Chan J C L. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 2007, 27: 157-167.
- [86] Zhou L T, Tam C Y, Zhou W, et al. Influence of South China Sea SST and the ENSO on winter rainfall over South China. *Adv Atmos Sci*, 2009, 27: 832-844.
- [87] 陶诗言, 张庆云. 亚洲冬夏季风对ENSO事件的响应. *大气科学*, 1998, 22: 399-407.
- [88] Huang R H, Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6: 21-32.
- [89] 赵振国. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响. *大气科学*, 1996, 20: 422-428.
- [90] 龚道溢, 王绍武. ENSO对中国四季降水的影响. *自然灾害学报*, 1998, 7: 44-52.
- [91] 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 东亚冬季风对ENSO事件的响应特征. *大气科学*, 2008, 32: 335-344.
- [92] Wang S W. El Niño and summer temperatures in Northeast China, 1860-1980. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter*. 1984, 25: No.4.
- [93] Weng H, Behera S K, Yamagata T. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dynamics*, 2009, 32: 663-674.
- [94] Weng H, Wu G X, Liu Y M, et al. Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans. *Climate Dynamics*, 2011, 36: 769-782.
- [95] Feng J, Wang L, Chen W, et al. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter. *J Geophys Res*, 2010, 115, D24122. doi: 10.1029/2010JD014761.
- [96] Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. *Int J Climatol*, 2010. doi: 10.1002/joc.2217.
- [97] Feng J, Li J. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China. *J Geophys Res*, 2011, 116, D13102. doi: 10.1029/2010JD015160.
- [98] Yuan Y, Yang S. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles. *J Climate*, 2012, accepted.
- [99] Yuan Y, Yang S, Zhang Z. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between eastern and central Pacific El Niño: Possible effect of Indian Ocean SST. *J Climate*, 2012, accepted.