

文章编号: 1004-4965 (2005) 06-0634-08

近年来国内 ENSO 研究概述

陈奕德, 张 韧, 蒋国荣

(解放军理工大学气象学院二系, 江苏 南京 211101)

摘 要: 综合介绍了近年来国内学者在 ENSO 研究中取得的一些进展, 包括 ENSO 事件的指标和强度指数、ENSO 的机制、ENSO 的预测。认为 ENSO 研究中其指标和强度指数朝着综合指标方面发展是一种趋势; ENSO 循环不仅仅是一种热带海洋气候和大气气候事件, 更是一种全球性行为, 其机制的研究还有待深入; 对 ENSO 的模式预测存在不稳定, 尚不能完整、准确地预报所有 El Niño/La Niña 事件。

关 键 词: ENSO; 指标; 强度指数; 机制; 预测; 概述

中图分类号: P732

文献标识码: A

1 引 言

发生在月和季时间尺度上的海气相互作用一般是与大气中的短期变化或者大气-海洋系统的季节强迫有关系。在年际时间尺度上, 不再有大气-海洋系统的外部强迫, 以至于变化必然是由于伴随着许多正、负反馈的内部作用所致。最引人注意的一个内部变化的例子便是 ENSO 现象, 它可以认为是海洋-大气系统的一个自由振荡^[1]。

ENSO 实际上由两个分量组成, 第一个分量 (主要对海洋) 称为 El Niño, 第二个分量 (主要对大气) 是指南方涛动 (SO: Southern Oscillation)。1960 年代中期 Bjerknes 的一系列经典著作推进了大气与海洋相互作用的研究, 他提出 El Niño 和 SO 事实上是热带太平洋大尺度海气相互作用同一现象的两个方面。另一方面, Philander 提出 El Niño 和 La Niña 也是互补的, 由暖的 El Niño 位相和冷的 La Niña 位相组成一个南方涛动循环。因此, 近年来把 El Niño 和南方涛动合起来称为 ENSO^[2]。

ENSO 是目前为止唯一已经确认的真实的全球尺度振荡, 也是迄今为止人类所观测到的全球大气和海洋相互耦合的最强信号之一, 它的发生将会对世界许多地区的气候产生重大影响, 是引起全球大气环流和水分循环异常的重要原因, 也是引起东亚季风水汽输送异常和旱涝发生的重要原因^[3-6], 因而成为我国进行气候预测时必须考虑的重要因素。因此, 近 20 年来 ENSO 研究一直是短期气候变化方面的一个研究焦点, 如 1996~2010 年间实施的国际气候变化及可预测研究 (CLIVAR) 计划已将 El Niño 列为重要的研究内容之一, 特别是 1998 年夏季长江流域、嫩江和松花江流域特大洪水发生后, 我国再次掀起了 ENSO 研究的高潮。本文主要就国内近几年对 ENSO 指标和强度指数的研究、机制的研究、预测的研究等方面取得的一些成果进行简要概述, 以期得到国内 ENSO 研究进展的一个概略印象。

收稿日期: 2004-07-28; 修订日期: 2004-12-07

作者简介: 陈奕德 (1978-), 男, 福建泉州人, 助教, 在读博士生, 主要从事海气相互作用及大气海洋数据融合研究。

E-mail: ydc780518@sina.com

2 ENSO 指标和强度指数研究

ENSO 循环是年际气候变化中的最强信号，它往往与大范围的大气环流异常变化相联系，国内许多学者研究认为，ENSO 对我国气候的影响也取决于其爆发的时间、发展阶段及其类型等^[7-12]。因此，ENSO 过程，包括 ENSO 事件爆发和结束时间、强度及其类型等的确定，对进一步加强 ENSO 检测诊断，正确认识 ENSO 形成规律及机制具有重要意义。

确认近百年来 El Niño 和 La Niña 事件及其强度，是当前广泛关注的问题。目前，多数学者使用赤道东太平洋的海温距平来表示 El Niño 的发生，把 Niño3 区（5°N~5°S, 150~90°W）的 SST 距平连续 3 个月大于 0.5 为 El Niño 爆发的标准。南方涛动通常用南方涛动指数（SOI，定义为 Darwin 与 Tahiti 间的海面气压差）表示^[13]。然而，对 ENSO 事件的划分历来就没有一个统一的结论，要确认历史上发生的 ENSO 事件及其强度，也还存在着很多问题。这主要体现在两个方面^[14]：一是使用的表征指标在不断地发展中，早期多用南方涛动指数，后来又用赤道东太平洋海表温度（Niño3 区和 NiñoC 区 SST），近来 Trenberth 建议使用 Niño3、4 区（5°N~5°S, 120~170°W）的 SST，而且不同的指标判断 ENSO 事件的标准也不同。二是时间分辨率问题，以往一些工作在确认 ENSO 事件时，由于受到资料的限制，主要以年的资料为主。在研究 El Niño 影响时，以年为单位，人们经常很难确定何年为 El Niño 年，因为 El Niño 一般并不是恰好发生在一个日历年之内，因此不同作者所定的 El Niño 年往往有不少分歧；而另一方面，研究 El Niño 的影响，往往是针对某一个季节，如夏季降水等，很难与年为单位的 El Niño 或 La Niña 年进行比较，而且有时一年之内的上下半年，可能分别出现 El Niño 和 La Niña 事件，用年资料并不能反映出来。因此，以季为单位确认 El Niño 及 La Niña 是一个十分迫切的任务，近来倾向于同时使用多种指标来确认 ENSO 事件。

美国国家环境预测中心和中国国家气候中心等利用 Niño1+2、Niño3、Niño4 区对 ENSO 事件进行监测；Angell 提出用 NiñoC 区（0~10°S, 180~90°W）的 SST 距平作为温度指标，中国也作为一个重要的监测区；王世平利用 Niño1+2、Niño3 和 Niño4 这 3 个海区海温指数之和作为 El Niño 事件的强度指数；这些指数对 El Niño 事件的判定取得了一定的成果，但依然存在不同程度的不足^[15]。

美国气候诊断中心（CDC）也提出了一个多变量的 ENSO 指标称为 MEI（Multivariate ENSO Index），它同时用到了海平面气压、地面经向风和纬向风、海表温度、海面气温以及总云量共 6 个要素对 El Niño 事件进行监测^[14]。李晓燕等^[15]采用 Niño1+2、Niño3、Niño4 区 SST 距平按照各海区所占面积大小进行加权平均，合成 El Niño 监测综合区来计算 SSTA 值，当该综合区海温距平 SSTA > 0.5 的值持续 6 个月以上时（如过程中有单个月份未达到指标，也可视为持续），为一次 El Niño 事件过程，而将此指数持续 6 个月以上 < -0.4 定义为一个 La Niña 过程。他们还建立了以 El Niño/La Niña 过程总累积温度距平为冷、暖事件的强度指标，综合反映了 El Niño/La Niña 过程长度、SST 变化、峰值等特征，最后以 El Niño/La Niña 过程累积 SSTA 和负的南方涛动指数（-SOI）的标准化值之和定义了 ENSO 事件的综合强度指标，对 1951 年以来的 14 个 ENSO 暖事件和 10 个冷事件及其长度、盛期、强度、爆发类型等特征进行定义，具有较好的代表性。

3 ENSO 机制研究

热带太平洋上空吹偏东的信风，在信风驱动下，大洋东海岸附近是离岸流，与之相伴随的是冷的上升流，从而造成在气候上赤道东太平洋的“冷舌”。在大洋西部，向西的赤道洋流使那里的海水在边界附近堆积，温跃层增厚，并形成表层暖水，这是“暖池”形成的动力学原因之一。与之同时，由于海水在大洋西部堆积，形成西高东低的压力梯度，这个压力梯度在定常状态下将与东风应力相平衡。在某些年份，如果信风一旦张弛，或改吹西风，东海岸附近的上升流减弱或消失，表层海水温度出现

正距平,同时,由西指向东的压力梯度在失去风应力的平衡后,也将驱使西太平洋的次表层暖水向东流动,在赤道东太平洋形成大面积的海温正距平,于是一次 El Niño 事件发生。这即为 Wyrtki 提出的经典的 ENSO 形成的海洋对信风张弛响应的动力学理论^[16]。然而,1982/1983 年的 El Niño 事件的初始正距平海温首先出现在赤道中太平洋,然后扩展到东太平洋海岸;另外,1986/1987 年的 El Niño 事件初始海温距平首先出现在西太平洋,并在温跃层有所反映,表明了 El Niño 的初始海温距平没有首先在东太平洋出现并不是偶然现象。1997 年发生了 20 世纪最强的一次 El Niño 事件,其初始的海表温度距平最早是在暖池出现的,然后海温正距平连同西风距平不断向东传播,并在传播过程中加强,特别是 20 °C 等温线也向东传播并加深。由此可见,过去由于热带西太平洋海洋观测资料太稀少,且资料质量差,影响了人们对 El Niño 事件全貌的认识^[17]。

随着研究的深入,人们认识到赤道海洋 Kelvin 波和 Rossby 波的存在。Philander 等(1984)和 Hirst (1986)提出了不稳定海洋波动理论^[18]。许多学者研究认为,大气低层风场异常所激发的海洋 Kelvin 波和 Rossby 波,在沿赤道传播过程中引起次表层海洋异常上翻或下沉是导致海表温度异常的主要原因^[19]。巢纪平和张人禾^[20]则从海气相互作用波动的观点出发讨论了不稳定海气相互作用现象,并认为在滤去 Kelvin 波的情况下,通过海气相互作用,耦合波动依然可以向东传播,而且可以产生不稳定。因此,他们提出了非线性热带海气耦合系统中的自激振荡现象在 ENSO 循环产生中的可能作用,ENSO 循环可以不靠赤道波系在大洋内部的传播及其在边界的反射这种过程来维持。

张人禾等^[22]认为使赤道东太平洋混合层变厚的机制不仅在于东传的西风应力激发的 Kelvin 波及其在大洋东边界反射产生的暖 Rossby 波,还在于西风应力本身到达赤道东太平洋时强迫产生的厚度正扰动异常。他们揭示的观测事实与延迟振荡子理论不同,强调了首先出现在热带西太平洋的纬向风应力异常及其东传在维持 ENSO 循环中的重要性。他们的理论分析和数值试验结果^[22-24]表明,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。严邦良等^[25]也指出热带西太平洋地区的风应力异常对 ENSO 循环有重要影响。他们的分析表明,赤道西太平洋地区西风异常对 ENSO 循环的作用在大气和海洋两个不同的分量都有表现,而海气相互作用不稳定与东边界反射对 El Niño 事件的发展及维持起重要作用。在 El Niño 事件形成初期,海气耦合系统所具有的能量对 El Niño 事件的发展有重要作用,它与赤道西太平洋地区风应力的强迫强度(风应力异常本身的大小及纬向风异常在赤道附近所覆盖的面积)有很大关系,风应力的强度越大,发生 El Niño 事件的可能性越大。

张韧^[26]使用模糊推理方法对 1970~1990 年发生的 El Niño/La Niña 事件发生和维持因子进行检测,认为超前 3 个月的赤道中西太平洋纬向西风异常可能是 1970 和 1976 年的 El Niño 事件的重要触发因子;中西太平洋前期的西风异常是 1982/1983 年 El Niño 事件的触发因子,随后的赤道东太平洋西风扰动增长对该 El Niño 事件起了巩固强化的作用;对于 1986、1987 年 El Niño 事件(尤其对其维持增强)起主要作用的应该是赤道东太平洋的西风扰动增长;而对 1988 年 La Niña 事件起主要作用的则是前期赤道东太平洋信风(东风)异常加强。其强调认为赤道东太平洋和赤道西太平洋是 El Niño 发生发展的两个敏感海区,不同 El Niño 事件前夕的信风和西风异常可能首先出现在上述两海区之一。

1986 年 Lau^[27]首先提出推测,认为热带大气季节内振荡通过海气耦合作用而增幅减频可激发 El Niño 事件,从而将 El Niño 和大气季节内振荡两类不同时间尺度的大气现象联系起来。李崇银和周亚萍^[28]的资料分析结果不仅证实了 El Niño 事件发生前热带大气(尤其是赤道西太平洋地区)季节内振荡有异常增强,显示了热带大气季节内振荡对 El Niño 的激发作用,还进一步指出在 El Niño 期间,热带大气季节内振荡明显偏弱,显示 El Niño 同热带大气季节内振荡存在相互作用。李桂龙等^[29]、李崇银等^[30]认为,大气季节内振荡可能是 ENSO 事件的触发因子之一,伴随 El Niño 的发生,热带大气季节内振荡迅速减弱,准定常系统的动能明显增加,表明不同周期尺度的波动系统之间存在着能量的串级输送。

董兆俊等^[31]指出,近赤道季风区显著低频振荡是 El Niño 发生发展的一个重要前兆,低频振荡能量向甚低频段的转移和输送可能是 El Niño 发生的一个重要机理。

除了与暖池热状况相联系的纬圈环流外,中纬度和东亚季风也应该与 ENSO 循环有关。根据“ ENSO 是热带太平洋海气相互作用的产物”的观点,李崇银等^[32-34]很早就强调大气环流异常在激发 ENSO 中也有重要作用。在 El Niño 事件之前的冬半年,东亚地区有频繁而强大的寒潮活动;这种强冷空气活动造成了持续的强东亚冬季风,并且使得赤道中西太平洋地区的信风减弱,使该地区对流活动和降水异常加强。强的对流活动所导致的热带 30~60 d 振荡的异常增强,以及信风减弱所引起的赤道太平洋 Kelvin 波异常,通过海气相互作用将激发产生 El Niño 事件。李崇银^[18]还提出:El Niño (La Niña) 发生之前,西太平洋暖池次表层的海温已有持续的正(负)距平(SOTA)存在,而正(负)SOTA 沿赤道温跃层东传到东太平洋是 El Niño (La Niña) 发生的直接原因;ENSO 循环其实是热带太平洋 SOTA 沿赤道及沿 10°N 和 10°S 两个纬度带作年际循环在赤道东太平洋的一种表现;热带太平洋 SOTA 的最强信号在西太平洋暖池区,暖池区 SOTA 的动向又对 ENSO 循环起关键作用,因此 ENSO 循环的真正源区是西太平洋暖池次表层;只有在赤道西太平洋纬向风异常的驱动下,暖池区的 SOTA 才沿赤道温跃层东传,赤道东太平洋的 SOTA 也才明显系统性西传,因此赤道西太平洋的纬向风异常是 SOTA 循环(或 ENSO 循环)的驱动力;持续的强(弱)东亚冬季风异常是引起赤道西太平洋西(东)风异常的主要原因,ENSO 主要是东亚季风异常引起的赤道西太平洋纬向风异常所驱动的热带太平洋次表层海温异常的循环;初步认为 SOTA 沿赤道东传主要是 Kelvin 波的作用,而 SOTA 沿 10°N 和 10°S 两个纬度带的西传主要是 Rossby 波的作用,洋流也有一定作用。穆明权等^[35]指出西太平洋暖池次表层海温的暖(冷)异常及其东传对 ENSO 的发生起着十分重要、且更直接的作用,同时,赤道西太平洋异常纬向风是造成次表层海温异常东传的重要原因,而纬向风的异常又是由于东亚冬季风异常活动所引起的,这间接地说明异常的东亚冬季风对西太平洋暖池次表层海温距平东传有重要作用。他们研究还发现,ENSO 发生后,北半球副热带地区将有次表层暖(冷)海温距平沿着 10~20°N 纬带西传,这是导致西太平洋暖池次表层海温发生异常的重要原因之一,也就是说,西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环之间是相互影响、相互作用的。黄荣辉等^[36,37]也提出了 ENSO 循环可能是亚洲季风区与 Hardley 环流区之间存在的低频振荡的产物,并进一步指出赤道附近西风异常是 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。

吴国雄和孟文^[38]的研究表明,赤道印度洋和东太平洋海表温度年际变化之间存在显著的正相关,并指出印度洋这种变化与 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,并指出,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。他们^[39]还分析了 IAP/LASG GOALS 气候模式多年积分结果,发现模式中也同样存在与观测资料分析结果相似的印度洋-太平洋“齿轮式”耦合,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。

另外,刘式适等^[40-42]分别讨论了地球自转的振荡理论、波动理论和海气耦合理论,指出地球自转速率的变化不但直接影响纬向风和洋流的变化,而且通过 Kelvin 波的传播导致海平面和海温的变化,通过海气耦合使大气和海洋的 Kelvin 波和 Rossby 波的移动及稳定性发生变化,特别是在地球自转速率变慢时,通过海气耦合出现纬向风、洋流异常和大洋东部海表温度增加,从而导致引起全球气候异常的 El Niño 事件。

综上所述,目前国内对 ENSO 形成机制的研究呈现十分活跃的局面,不仅仅局限于西风异常、不稳定波动理论的研究,还把很大的精力集中于热带季节内振荡、亚洲季风异常对 ENSO 触发机制的研究上,并取得大量的研究成果。同时,人们还把探索的目光投向印度洋、欧亚大陆雪盖^[43]、地球本身

的运动状态甚至是太阳黑子的活动上^[44],开拓了人们研究 ENSO 的广阔视野。但是,大气-海洋系统是一个复杂的非线性系统,其发展、演变及异常都是由众多制约因子通过非线性机理共同实现的,导致每次 ENSO 发生和发展的原因可能是多种因素的非线性共同作用,在特定条件下,可能对于某个 ENSO 事件这个因子占主导地位,而在其它条件下,另一些因子可能会起更加显著的作用。因而,ENSO 循环机理问题可能不仅仅是热带太平洋区域海气相互作用问题,它和东亚季风、太平洋暖池、热带大气季节内振荡、热带印度洋、东亚大槽等应该是一个有机整体,它们的变异存在内在的相互联系。它可能也不仅仅是气候学家和海洋学家的研究内容,还可能涉及到地学的方方面面,需要地球物理学各方面的共同研究来解决 ENSO 循环的机制问题。

4 ENSO 预测研究

由于赤道东中太平洋海温异常(即 El Niño 与 La Niña 事件)与热带和全球许多地区的气候异常和灾害有密切联系^[3-12],因此,热带太平洋海温距平的季与年的模拟与预报引起各国气候和海洋学家的关注。系统的研究 ENSO 预测是在 1982~1983 年强 ENSO 事件之后,而最重要的实践是 1985~1994 年间进行的热带海洋和全球大气研究计划(TOGA),该计划不仅对研究 ENSO 循环的物理机制做出了十分重大的贡献,同时,对于 ENSO 预测研究而言,该计划取得的最主要成果表现在三个方面:(1)建立了太平洋区域经常性的海洋观测系统,使得对太平洋上层海洋资料的实时分析成为可能;(2)对 ENSO 形成的动力学研究取得了重要进展^[45],为 ENSO 预测研究提供了依据;(3)建立了复杂程度不同的预报 ENSO 的海气耦合模式,在一些试验预报中显示出具有提前一年预报出 ENSO 的能力,从而大大鼓舞了研究人员使用海气耦合模式预报季到年气候异常的努力^[14]。

ENSO 的预测在这里主要指做季与年时间尺度的预测,其预报对象一般是 Niño3 区或 Niño3+4 区的海温指数、南方涛动指数和热带太平洋格点海温距平。对 ENSO 的预测一般用三种方法:数理统计方法建立模型、气候动力学模式以及统计与动力相结合的方法。其中,统计模式中主要用典型相关分析(CCA)、主振荡分析(POP)、经验正交函数 EOF)、主分量回归(PC)、神经网络、线性反演、奇异值分解(SVD)、马尔科夫等方法;气候动力学模式又分为复杂的全球大气耦合海洋模式(AOGCM),中等混合型模式(即复杂的全球大气或海洋环流模式耦合简单动力学或统计的海洋或大气模式),简单模式(即简单海气耦合动力学模式和大气分量为统计大气)。大部分模式可作未来 1~24 个月的预测,衡量预报水平的标准一般采用 Niño3 (或 Niño3+4) 指数的预报结果与观测结果作相关分析。

根据 Bjerknes-Wyrski 关于 ENSO 理论和循环机制的进一步认识,在 1980 年代发展出许多高度理想化的耦合模式,第一个模拟 ENSO 取得重要成果的耦合模式是 Cane 和 Zebiak 模式,即所谓的 ZC 耦合模式,它是显式地描写 Bjerknes-Wyrski 理论物理本质的对月平均状态的距平模式,从而绕过了模拟气候平均状态的复杂困难问题(如:气候漂移问题)。这个模式提前一年预报出了 1987 年和 1991 年的 ENSO 事件,受到广泛关注,但是它没有预报出 1997 年的 ENSO 事件。

自 1980 年代后期开始,美国国家海洋大气局(NOAA)的气候分析中心(CAC)在每个月出版的气候诊断期刊上,定期发布几个动力学模式和气候统计学模型对热带太平洋海温距平的预报。从 1990 年代初期开始,美国 NOAA 的气候预测中心不定期和定期出版超前长期预报试验期刊,其中也刊登几个动力学模式和气候统计学模型对热带太平洋海温距平的预报。中国的气候学家自 1990 年代初期开始,在中国气象局召开的短期气候预测会商会上开始用动力学模式和数理统计学模型试验进行热带太平洋海温预报。自 1997 年开始,有几个动力学模式和气候统计学模型在全国短期气候预测会商会上系统性做热带太平洋海温预报,并在国家气候中心出版的气候预测评论上定期发表预测意见^[21]。周广庆等^[46,47]利用 IAP 热带太平洋和全球大气耦合环流模式,设计了“气候异常”初始化方案,并进行了十

几年的系统性后报检验，建立了 IAP ENSO 预测系统。目前，国内做 ENSO 预报的主要有数理统计模型（表 1）和动力学模式（表 2）。

表 1 国内做 ENSO 预测的数理统计模型^[21]

作者（年）	统计模型类型	预报对象
翟盘茂等(1995)	EOF 迭代模型	Niño3
翟盘茂等(1997)	SVD 模型	Niño3
翟盘茂等(1997)	相似预报模型	Niño3
翟盘茂等(1997)	过滤-最优迭代模型	Niño3

表 2 国内做 ENSO 预测的动力学模型^[21]

大气部分	AGCMs	简单动力模式	统计大气
	OGCMs	IAP	NCCm
	简单	NCCs	NCC/NIM
海洋部分	动力模式	NJU	NCCn
			NCC/STI
			CAMS/NJU
			PKU

表 2 的说明：IAP(中科院大气所全球大气耦合海洋环流模式)；NCCs(国家气候中心两层大气耦合混合层海洋海冰模式)；NJU(全球大气耦合简单海洋动力学模式(未做实际预测))；NCCo(简单热带太平洋动力学模式原版)；NCCn(简单热带太平洋动力学模式新版)；NCC/STI(国家气候中心和上海台风所联合热带太平洋动力模式)；CAMS/NJU(中国气象科学研究所和南京大学联合热带动力模式)；PUK(北京大学热带太平洋动力模式(未做实际预测))；NCCm(国家气候中心全球海洋环流模式耦合统计大气模式)；NCC/NIM(国家气候中心和南京气象学院联合热带太平洋简单动力模式耦合统计大气模式)。

另外，史历和殷永红等^[48]利用一个全球热带简单海气耦合模式（GTSM）、选取热带三大洋较强的冷暖事件作为预报对象，对太平洋（42 个预报个例）、印度洋（32 个预报个例）、大西洋（44 个预报个例）的试验性预报及误差分析发现：在该模式中由于热带三大洋海气耦合通过大气模式发生相互作用和影响，使得模式对于东大西洋和中东印度洋的较强冷暖事件的预报能力明显高于单独大西洋、单独印度洋简单海气耦合模式，预报结果和观测相关系数在 0.5 以上的月份分别达到 9 个月和 6 个月左右，而在东太平洋则和 ZC 模式差不多，达到 15 个月左右。

丁裕国和江志红等^[49]也提出使用奇异谱分析（SSA）与自回归（AR）预测模型相结合的方案对 Niño3 区平均 SST 逐月距平序列作自适应滤波意义下的超前预报，取得较高的可信度。他们^[50]还提出一种基于主分量典型相关分析（PC-CCA）的广义典型混合回归模式，同时引入 EEOF、PRESS 准则和集成预报等技术思想，在优选物理因子、确定最佳模式参数的基础上，对 Niño 海区海温指数作超前 1~4 季度预报，试验表明，该模式方案性能稳定，总体预报技术水平达到美国 NOAA/NWS/NCEP/气候诊断公报（CPC）所用同类模型水平，而预报同类产品所需因子数远少于 CPC 方法，有可能为建立我国的 ENSO 业务监测系统提供有益的基础。此外，粟珂等^[44]也利用 Markov 随机过程和一阶自回归建立概率预测模型，对 2002 年前后的 El Niño 发生概率进行了预报尝试。

然而，对 ENSO 的预测依然存在许多不足^[50]，例如预报效果的稳定性随季节漂移，预报时效的稳定性和延伸长度随不同模式而有明显差异。通过对 1997~2000 年发生的 El Niño/La Niña 事件的实际预报的严格检验表明，国内外的统计模型和动力学模式具有一定的预报 El Niño/La Niña 过程的能力。但是模式的预报能力是不稳定的，没有一个模式能完全正确地预测出这两次事件的发生、顶峰和结束时间及其强度。此外，检验还表明，各个模式做集合预报以及多个模式做合成预报都有助于提高对 El Niño/La Niña 事件的变化趋势的预报能力^[21]。

目前 ENSO 预测的研究状况正如张人禾等^[51]在综合国内外各种模式的预测结果后指出的那样：（1）预测的可靠性随预测时间的增加而逐渐降低，18 个月后的预测可信度已经很低了；（2）模式在做 3 个月以上的预报时，其可靠性普遍高于持续性预测。而在做 1~3 个月的预测时，依其所采用的初始化方法（针对动力学模式）的不同而不同。海洋资料同化方法及其在 ENSO 预测中的应用成为当前 ENSO 预测研究的热点；（3）模式预报能力具有时间依赖性，主要表现在两方面：一是具有十年际的

变化,即对某一时段的 ENSO 预测较好而对另一时段的预测较差;二是模式的预报能力与预报的起始季节和 ENSO 的发生季节有关。

5 结束语

实际的大气-海洋系统是一个复杂的非线性系统,其发展、演变及异常都是由众多制约因子通过非线性机理共同实现的,对于 ENSO 这样的全球海洋气候和大气气候事件,在考虑热带海洋和大气的同时,还必须考虑中高纬度区域通过某些中间机制与热带海洋和大气的间接相互作用,通过东亚季风、印度季风、热带大气季节内振荡、东亚大槽实现与 ENSO 的相互作用,或许还有地球本身的自转、太阳黑子变化或其它可能的变化对地球气候系统造成的影响。针对如此众多可能因素的非线性相互作用,在进行 ENSO 机制和预测研究时,我们可能需要接受这样一种观点,即导致每次 ENSO 发生和发展的原因都是多种因素的非线性共同作用,在特定条件下,可能对于某个 ENSO 事件这个因子占主导地位,而在其它条件下,另一些因子可能会起更加显著的作用。对于在 ENSO 预测研究中遇到的种种困难,一方面,可能在于人们对 ENSO 机制的研究还未能取得完全的胜利,另一方面,可能是 ENSO 机制研究中取得的新成果短时间内未能融入预测模型中,因此,虽然在预测中使用了各种新技术,例如集合预报与合成预报,但也只能起到改进预测效果的作用,而未能取得预测效果的重大突破。

参 考 文 献:

- [1] JOSÉ P, Peixoto, ABRAHAM H Oort. 气候物理学[M]. 吴国雄, 刘 辉, 等译. 北京: 气象出版社, 1995. 329-338.
- [2] 巢纪平. 厄尔尼诺和南方涛动动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1993. 2-3.
- [3] 何金海, 宇婧婧, 沈新勇, 等. 有关东亚季风的形成及其变率的研究[J]. 热带气象学报, 2004, 20(5): 449-459.
- [4] PAN Y H, Oort A. Global climate variations connected with sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific Ocean for the 1958-1973 period[J]. Mon Wea Rev, 1983, 111(6): 1244-1258.
- [5] 陈海山, 孙照渤, 倪东鸿. NiñoC区秋季海温异常对东亚冬季大气环流的影响[J]. 热带气象学报, 2002, 18(2): 148-156.
- [6] 邹 力, 吴爱明, 倪允琪. 在准两年尺度上 ENSO 与亚洲季风相互作用的研究[J]. 热带气象学报, 2002, 18(1): 19-28.
- [7] 谌 芸, 施 能. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. 热带气象学报, 2003, 19(2): 135-146.
- [8] 朱艳峰, 陈隆勋, 宇如聪. 中国气候异常变化与 ENSO 准四年循环的联系分析[J]. 热带气象学报, 2003, 19(4): 345-355.
- [9] 刘永强, 丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响[J]. 大气科学, 1995, 19(2): 200-208.
- [10] HUANG R H, WU Y F. The influence of ENSO on the summer climate in China and its mechanism[J]. Adv Atmos sci, 1990, 6(1): 21-23.
- [11] 李崇银. El Niño 影响西太平洋台风活动的研究[J]. 气象学报, 1987, 45(2): 229-236.
- [12] 张人禾. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 567-574.
- [13] 赵其庚. 海洋环流及海气耦合系统的数值模拟[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 179-182.
- [14] 王绍武, 龚道溢. 近百年来的 ENSO 事件及其强度[J]. 气象, 1999, 1(1): 9-19.
- [15] 李晓燕, 翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究[J]. 气象学报, 2000, 58(1): 103-109.
- [16] 巢纪平, 巢清尘. 热带西太平洋对风应力响应的动力学[J]. 大气科学, 2002, 26(2): 145-160.
- [17] 张人禾, 巢纪平. 对 ENSO 循环机理的一些新认识[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 175-183.
- [18] 李崇银. 关于 ENSO 本质的进一步研究[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 161-174.
- [19] 张祖强, 丁一汇, 赵宗慈. 1997/1998 年 El Niño/La Niña 期间洋流的演变特征和影响的分析[J]. 大气科学, 2001, 26(2): 128-141.
- [20] CHAO Jiping, ZHANG Renhe. The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities[J]. ACTA Meteor Sinica, 1988, 2(3): 275-287.
- [21] 王绍武. 现代气候学研究进展[M]. 北京: 气象出版社, 2001. 161-225.
- [22] 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 —— 资料诊断和理论分析[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 587-599.
- [23] HUANG Ronghui, ZANG Xiaoyun, ZHANG Renhe, et al. The westerly anomalies over the tropical Pacific and their dynamical effect on the ENSO cycles during 1980-1994[J]. Adv Atmos Sci, 1998, 15(2): 135-151.
- [24] 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 —— 模式结果分析[J]

- 大气科学, 2001, 25(2): 160-172.
- [25] 严邦良, 张人禾. 热带西太平洋风应力异常在 ENSO 循环中作用的数值试验[J]. 大气科学, 2002, 26(3): 316-329.
- [26] 张 韧. El Niño/La Niña 过程影响因子的模糊诊断分析[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 8-14.
- [27] LAU K M, CHAN P H. The 40~50 days oscillation and El Niño/Southern Oscillation: A new perspective[J]. Bulletin Amer Meteor Soc, 1986, 67(5): 533-535.
- [28] 李崇银, 周亚萍. 热带大气季节内振荡与 ENSO 的相互关系[J]. 地球物理学报, 1994, 37(1): 17-26.
- [29] 李桂龙, 李崇银. 大气季节内振荡的活动与 El Niño[J]. 热带气象学报, 1998, 14(1): 54-62.
- [30] 李崇银, 廖清海. 热带大气季节内振荡激发 El Niño 的机制[J]. 热带气象学报, 1998, 14(2): 97-105.
- [31] 董兆俊, 陈奕德, 张 韧, 等. 季风低频振荡与厄尔尼诺的发生发展[J]. 海洋通报, 2002, 21(1): 10-18.
- [32] 李崇银. 频繁强东亚大槽活动与 El Niño 的发生[J]. 中国科学 (B), 1988, 18(6): 667-674.
- [33] 李崇银. 气候动力学引论 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 2000. 259-274.
- [34] LI Chongyun. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events[J]. Adv Atmos Sci, 1990, 7(1): 36-46.
- [35] 穆明权, 李崇银. 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的相互作用[J]. 大气科学, 2000, 24(4): 447-460.
- [36] 黄荣辉, 吴仪芳. 关于 ENSO 循环动力学的研究[A]. 海洋环流研讨会论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. 41-51.
- [37] 黄荣辉, 付云飞, 藏晓云. 亚洲季风与 ENSO 循环相互作用[J]. 气候与环境研究, 1996, 1(1): 38-54.
- [38] 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 ——资料分析[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 470-480.
- [39] 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 ——数值模拟[J]. 大气科学, 2000, 24(1): 15-25.
- [40] 刘式适, 刘式达, 傅遵涛. 地球自转与 El Niño——振荡理论[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 590-598.
- [41] 刘式适, 刘式达, 傅遵涛. 地球自转与 El Niño——波动理论[J]. 地球物理学报, 2000, 43(2): 152-159.
- [42] 刘式适, 蒋 循, 刘式达, 等. 地球自转与 El Niño——海气耦合理论[J]. 地球物理学报, 2001, 44(4): 478-489.
- [43] 谭言科, 胡邦辉, 何金海. 北半球夏季遥相关的年际振荡及其与 ENSO 循环的可能联系[J]. 热带气象学报, 1999, 15(4): 297-304.
- [44] 栗 珂, 刘耀武, 杨文峰, 等. El Niño 事件的概率预测研究[J]. 热带气象学报, 2001, 17(2): 125-134.
- [45] 赵姗姗, 杨修群. 一个耦合环流模式中的 ENSO 循环特征及控制机理[J]. 气象科学, 2000, 20(3): 389-399.
- [46] 周广庆, 李 旭, 曾庆存. 一个可供 ENSO 预测的海气耦合环流模式及 1997/1998 ENSO 的预测[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 349-357.
- [47] ZHOU Guangqing, ZENG Qincun. Predictions of ENSO with a Coupled GCM[J]. Adv Atmos Sci, 2001, 18(4): 587-603.
- [48] 史 力, 殷永红, 倪允琪. 全球热带简单海气耦合模式中的 ENSO 预报试验[J]. 大气科学, 2001, 25(5): 628-640.
- [49] 丁裕国, 江志红, 朱艳峰. Niño 海区 SSTA 短期气候预测模型试验[J]. 热带气象学报, 1998, 14(4): 289-296.
- [50] 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检验[J]. 热带气象学报, 1999, 15(4): 322-329.
- [51] 张人禾, 周广庆, 巢纪平. ENSO 动力学与预测[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 674-688.

SUMMARY OF CHINESE RESEARCH ON ENSO IN RECENT YEARS

CHEN Yi-de, ZHANG Ren, JIANG Guo-rong

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: This paper summarized some progresses of Chinese research about ENSO in recent years. It included the ENSO intensity indices and indicators, the ENSO mechanism and its prediction. It drew the conclusion that the intensity indices and indicators should develop to be synthesis indicators in the ENSO research, the ENSO cycle should be not only an event of the tropic ocean climate or the atmospheric climate, but also a global behavior, whose mechanism research should be done in the future, and the models to predict the ENSO were not stable enough to forecast all the El Niño/La Niña events fully or accurately.

Key words: ENSO; indicators; intensity indices; mechanism; prediction; summarize