

李崇银, 穆穆, 周广庆, 等. ENSO 机理及其预测研究. 大气科学, 2008, **32** (4): 761~781

Li Chongyin, Mu Mu, Zhou Guangqing, et al. Mechanism and prediction studies of the ENSO. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 761~781

ENSO 机理及其预测研究

李崇银 穆穆 周广庆 杨辉

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

摘 要 资料分析研究表明 ENSO (El Niño 和 La Niña) 实际上是热带太平洋次表层海温距平的循环, 而次表层海温距平的循环是赤道西太平洋异常纬向风所驱动的, 赤道西太平洋的异常纬向风又主要由异常东亚冬季风所激发。因此可以将 ENSO 的机理视为主要是由东亚季风异常造成的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。同时分析还表明, 热带西太平洋大气季节内振荡 (ISO) 的明显年际变化, 作为一种外部强迫, 对 ENSO 循环起着十分重要的作用; El Niño 的发生同大气 ISO 的明显系统性东传有关。资料分析也表明, El Niño 持续时间的长短与大气环流异常有密切关系。

用非线性最优方法研究 El Niño-南方涛动 (ENSO) 事件的可预报性问题, 揭示了最容易发展成 ENSO 事件的初始距平模态, 即条件非线性最优扰动 (CNOP) 型初始距平; 找出能够导致显著春季可预报性障碍 (SPB), 且对 ENSO 预报结果有最大影响的一类初始误差——CNOP 型初始误差, 进而探讨耦合过程的非线性在 SPB 研究中的重要作用, 提出了关于 ENSO 事件发生 SPB 的一种可能机制; 用 CNOP 方法揭示了 ENSO 强度的不对称现象, 探讨 ENSO 不对称性的年代际变化问题, 提出 ENSO 不对称性年代际变化的一种机制; 建立了关于 ENSO 可预报性的最大可预报时间下界、最大预报误差上界和最大允许初始误差下界的三类可预报性问题, 分别从三个方面揭示 ENSO 事件的春季可预报性障碍现象, 比较有效地量化了模式 ENSO 事件的可预报性。

利用中国科学院大气物理研究所地球流体力学数值模拟国家重点实验室的 ENSO 预测系统, 研究了海洋资料同化在 ENSO 预测中的应用, 该系统可以同时同化温、盐剖面资料和卫星高度计资料进行同化。并且在模式中采用次表层上卷海温的非局地参数化方法, 可有效地改进 ENSO 模拟水平。采用集合卡曼滤波 (Ensemble Kalman Filter, EnKF) 同化方法以及在集合资料同化中“平衡的”多变量模式误差扰动方法为集合预报提供更加精确和协调的初始场, ENSO 预报技巧得到提高。

关键词 ENSO 机理 可预报性 预测

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0761-21

中图分类号 P461

文献标识码 A

Mechanism and Prediction Studies of the ENSO

LI Chongyin, MU Mu, ZHOU Guangqing, and YANG Hui

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

Abstract A new theory on the ENSO cycle is advanced in this study: the ENSO is an interannual cycle of SOTA in the tropical Pacific driven by zonal wind anomaly over the equatorial western Pacific which is caused mainly by anomalous East Asian winter monsoon. El Niño (La Niña) or ENSO is really the subsurface ocean temperature anomalies

收稿日期 2008-03-07, 2008-03-17 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划计划项 2006CB403600, 中国科学院创新项目 KZCX3-SW-226

作者简介 李崇银, 男, 1940 年出生, 中国科学院院士, 研究员, 主要从事热带气象、气候变化及其动力学研究。

E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

(SOTA) in the tropical Pacific. The interannual cycle of SOTA in the tropical Pacific is driven by zonal wind anomaly over the equatorial western Pacific which is caused mainly by anomalous East Asian winter monsoon. The strongest signal of interannual variations of the tropical atmospheric ISO (intraseasonal oscillation) lies in the western Pacific. As an external forcing, the interannual variations of the ISO play an important role in the ENSO cycle. The occurrence of El Niño (La Niña) is related to the eastward (westward) propagation of ISO. The circulation anomalies are strongly related to the lasting time of El Niño events.

Nonlinear optimization method is used to explore the predictability problems for ENSO events. Significant results are obtained. Conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) acts as the initial anomaly pattern that evolves into the ENSO event most probably. And the CNOP-type error superimposed on the ENSO event causes a significant “spring predictability barrier” (SPB) and has the largest negative effect on the prediction. A possible mechanism for SPB is provided to explain SPB, which suggests the role of nonlinearity in SPB. Besides, by using the CNOP approach, the ENSO amplitude asymmetry is addressed by nonlinearity. The decadal change of ENSO asymmetry is also revealed and an explanation is given to address the mechanism. Finally, the lower bound of the maximum predictable time, the upper bound of maximum prediction error, and the lower bound of maximum allowable initial error for ENSO events are established with three different nonlinear optimization problems, which reveal the SPB for ENSO events from three different perspectives.

Furthermore, an ENSO prediction system is developed. In that system, a three-dimensional variational ocean data assimilation system is used. This is capable of assimilating in situ sea water temperature and salinity observations and satellite altimetry data. An empirical parameterization of subsurface entrainment temperature in the coupled model may effectively improve ENSO simulation. An ensemble Kalman filter data assimilation system is implemented to provide the initial ensemble. And balanced multivariate model error is used in the ensemble Kalman filter data assimilation. ENSO prediction is improved well by those ensemble forecasts.

Key words ENSO, mechanism, predictability, prediction

1 引言

El Niño (La Niña) 被认为是年际气候变化的最强信号, 它的发生往往给全球不少地方造成严重洪涝、干旱及其他灾害, 从而受到全世界的普遍关注^[1~3]。为了搞清 El Niño 发生的原因, 国外科学家相继提出了关于 El Niño 产生机制的所谓信风张弛理论^[4]、不稳定海洋波动理论^[5, 6]和延迟振子理论^[7, 8]。上述研究虽然各自都能部分地解释 El Niño (La Niña) 的发生和演变特征, 但 El Niño 发生的确切原因仍未真正搞清楚, 对 El Niño 的预测也就还处于试验阶段。从物理本质而论, 波和振荡是同一范畴, 波可视为振荡的传播。就 Niño3 区海表温度异常 (SSTA) 的年际变化来看, ENSO (或 El Niño - La Niña - El Niño - ……) 循环确实可以认为是一种振荡现象。解释 ENSO 发生机制的延迟振子理论却认为 ENSO 循环本质是海洋对前期风强迫的滞后响应, 而其循环的时间尺度要取决于局地海气相互作用的正反馈过程和赤道波在西边界被反射的时滞负反馈过程。但这里提到的一个重要

过程, 即西边界反射, 却被不少研究所否定^[9~11]。同时, 延迟振子理论还假定在赤道西太平洋的海-气相互作用比较弱, 也与实际观测不相符。充电式振子模型虽是延迟振子理论的进一步发展^[12], 它包括有 SST 的变化, 也有风应力的异常和温跃层厚度的振荡, 但仍然只反映了 ENSO 的一个侧面, 因为它强调先有 SST 的异常, 再导致赤道西风的爆发, 与观测并不一致。因此, 进一步研究 El Niño (La Niña) 或 ENSO 的形成机制是十分必要的。

根据“El Niño 是热带太平洋海-气相互作用的产物”的观点^[13], 我们一直强调大气环流异常在激发 El Niño 中的重要作用。已指出持续的强 (弱) 东亚冬季风将导致赤道西太平洋地区的持续西 (东) 风异常和强 (弱) 大气季节内振荡, 通过海-气相互作用, 它们是激发 El Niño (La Niña) 的重要因子^[14~16]; 用 GCM 所作的数值模拟试验也证明了上述资料分析结果是正确的^[17]。近几年我们的分析研究发现, 西太平洋暖池的次表层海温异常 (SOTA) 及其向东传播与 El Niño 及 La Niña 的发生有直接关系, 而 SOTA 的东传与赤道西太平洋

异常纬向风有关^[18]。其后,巢纪平等^[19]从研究海温距平最大变化曲面,得到了类似的结果;周广庆和李崇银^[20]用一个海-气耦合模式所作的数值模拟也得到了完全一样的结果。

在 ENSO 可预报性研究上, Mu 等^[21]提出的条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法,与国际上许多研究采用线性奇异向量 (LSV) 法不同,条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法更利于揭示非线性系统的特征。使用 CNOP 方法揭示了最容易发展成 ENSO 事件的前期征兆 (最优前期征兆): 即赤道东太平洋负 (正) 的海表温度距平和正 (负) 的斜温层深度距平最容易发展成 El Niño (La Niña) 事件^[22]。该理论结果解释了斜温层变化领先于海表温度变化的观测事实,从物理上阐明 ENSO 最优前期征兆形成及其发展成 ENSO 事件的机制。使用 CNOP 方法还揭示了 ENSO 事件的“春季可预报性障碍”现象^[23, 24]; 对于所用模式,找出了最容易导致春季可预报性障碍的初始误差模态,弄清了耦合过程的非线性在 ENSO 春季可预报性障碍研究中的重要作用,提出关于春季可预报性障碍的一种可能机制,即: (1) 季节循环在春季具有强的海气耦合不稳定性; (2) El Niño 在春季具有强的动力学不稳定性 and 最弱的持续性; (3) El Niño 初始误差的发展与 El Niño 事件本身在春季具有相同的增长机制。从而拓展了 Webster 和 Yang^[25]关于春季可预报性障碍机制的解释。Duan 等^[26]进一步研究 ENSO 可预报性的量化问题,建立了关于 ENSO 事件第一类可预报性问题的三类子问题,在一定程度上量化研究 ENSO 数值模式的可预报性,较有效地估计了模式中 ENSO 事件的最大可预报时间下界、最大预报误差上界和最大允许初始误差下界,分析非线性在 ENSO 事件最大预报误差下界估计中的重要作用。

ENSO 预测一直是国内外都十分重视的问题,中国科学院大气物理研究所 (以下简称大气所) 也进行了多年的研究试验。本文后一部分是介绍 ENSO 预测系统的研究和试验情况,包括海洋资料同化系统发展、次表层上卷海温的非局地参数化方法,以及 ENSO 的跨季度集合预测系统的改进等。

2 ENSO 循环的本质

1997 年初夏爆发了 20 世纪最强的一次 El

Niño 事件,而观测资料表明,在这次 El Niño 发生之前西太平洋暖池的次表层海温异常 (SOTA) 早已明显存在,且其正距平可追溯到 1996 年秋天。暖池区的正 SOTA 沿温跃层东传到赤道东太平洋并向海洋表层的扩展是 1997 年 El Niño 事件发生的直接原因。当 El Niño 事件发生之后,暖池区的 SOTA 又出现负距平,其后暖池区负 SOTA 的向东传播和在赤道东太平洋向海表的扩展便又直接激发产生了 1998 年的 La Niña。分析历史上的每一次 El Niño 事件,都可以发现暖池区的 SOTA 正 (负) 距平与 El Niño (La Niña) 都有密切联系。在 El Niño (La Niña) 发生之前,暖池的次表层都有正 (负) SOTA 存在; El Niño (La Niña) 爆发后,暖池的次表层又都变成负 (正) SOTA 控制。由于温跃层从赤道西太平洋到赤道东太平洋是逐渐升高的,当暖池区的正 (负) SOTA 向东传到赤道东太平洋时,赤道东太平洋海表水温 (SST) 也将出现正 (负) 异常,暖池次表层正 (负) SOTA 的东传也就直接与 El Niño (La Niña) 的爆发有关。换句话说,暖池区的正 (负) SOTA 和它东传到赤道东太平洋,可以视为 El Niño (La Niña) 发生的重要原因。

为了进一步揭露暖池区 SOTA 对 ENSO 爆发的重要作用,我们分析了用一个海-气耦合模式所进行的多年积分资料。模式模拟的 Niño 3 区 SSTa 和暖池区 SOTA 的时间变化表明,在暖事件之前暖池区都有正 SOTA 出现,而在暖事件爆发之后暖池区的 SOTA 又变为负值; 相反,冷事件却总是与暖池区先期的负 SOTA 相对应,而在冷事件爆发之后暖池区的 SOTA 又变为正值 (图略)。数值模拟结果与观测十分一致,充分说明了暖池区次表层海温异常对 ENSO 的发生有重要作用。

2.1 SOTA 的循环与 El Niño (La Niña)

进一步的分析我们还可以清楚看到,在暖池区正 SOTA 沿赤道温跃层向东传播的同时,在 10°N 和 10°S 纬度带有负 SOTA 的向西传播,并逐渐在西太平洋扩展到赤道暖池区,在暖池区形成负 SOTA; 而在暖池区负 SOTA 沿赤道温跃层东传的时候,在 10°N 和 10°S 纬度带又有正 SOTA 的向西传播,并逐渐在西太平洋扩展到赤道暖池区,又形成暖池区的正 SOTA。换句话说,El Niño - La Niña (或 ENSO) 实际上可以认为是热带太平洋次表层的海温距平沿赤道及沿 10°N 和 10°S 纬度带的一种

循环。

为了更清楚地看到热带太平洋次表层海温异常的循环特征,在图 1 中给出了 1979~1993 年间沿赤道 (C) 和沿 10°N 纬带 (A) 的 SOTA 的时间-经度剖面,以及西太平洋 SOTA 的时间-纬度剖面 (B)。为了方便,我们从 C 图 1981 年开始看,一个明显的 SOTA 正距平由暖池地区 ($140^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$) 东传并于 1982 年夏在赤道东太平洋形成强正距平, SSTA 也出现强正距平;然后正距平沿 10°N 纬带西传 (A 图) 于 1984 年到达西太平洋,再南传 (B 图) 到赤道西太平洋;其后,在赤道西太平洋暖池区的 SOTA 正距平从 1985 年开始又东传 (C 图), 1986 年夏在赤道东太平洋形成 SOTA 正距平,并导致 1986 年的 El Niño。同样, SOTA 负距平也有完全一样的循环过程,并形成 1984 年和 1988 年的 La Niña (冷事件)。

同样,如果用 10°S 纬度的资料,也可以有与图 1 十分相似的结果。从图 1,我们可以清楚地看到,

El Niño (La Niña) 实际上是热带太平洋次表层海温异常沿赤道及 10°N 和 10°S 纬带作年际循环在赤道东太平洋的反映。热带太平洋次表层海温异常最强的海区是西太平洋暖池区,但那里温跃层比较深 ($150\sim 200\text{ m}$),与之相对应的 SSTA 在该区域并不大;然而赤道东太平洋温跃层比较浅薄 ($30\sim 50\text{ m}$),次表层海温异常 (SOTA) 在那里与 SSTA 近乎一样, SSTA 在赤道东太平洋反而显得更大。就 SSTA 而论,用赤道东太平洋海表温度异常来定义 El Niño (La Niña) 循环也是自然的。但也应该知道,如果就热带太平洋 SOTA 而论, El Niño (La Niña) 或 ENSO 的真正源应是在西太平洋暖池的次表层。

ENSO 的发生直接与暖池次表层海温异常的东传有关,那么是什么因素导致暖池次表层海温异常的东传? 通过一些分析我们发现,赤道西太平洋地区的纬向风 (信风) 异常是暖池次表层海温异常向东传播的重要原因。赤道西太平洋的西风异常将驱动暖池次表层的正 SOTA 东传,并引发 El Niño;

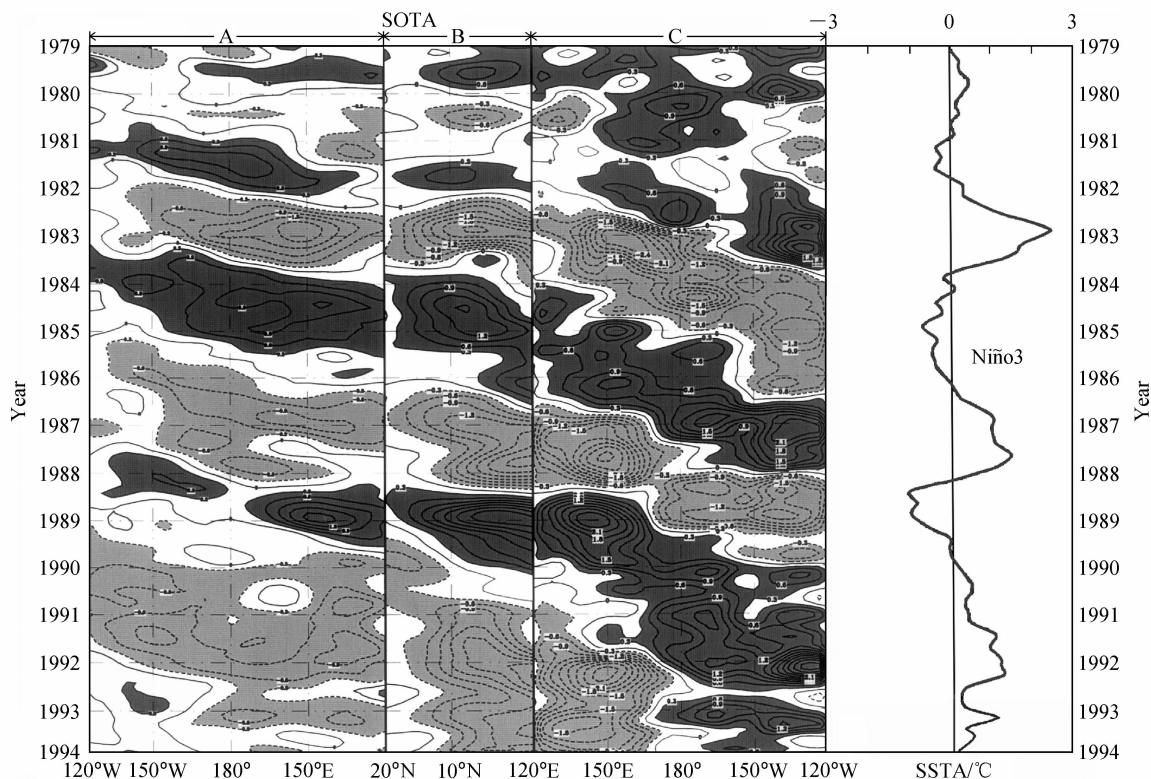


图 1 左图: 太平洋 SOTA 沿赤道 ($6^{\circ}\text{N}\sim 6^{\circ}\text{S}$ 平均, C) 和沿 10°N 纬带 (A) 的时间-经度剖面以及西太平洋 ($120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 平均) SOTA 的时间-纬度剖面 (B); 右图: Niño3 区 SSTA 的时间变化

Fig. 1 Time-longitude sections of SOTA (subsurface ocean temperature anomalies) in the tropical Pacific along the equator ($6^{\circ}\text{N}\sim 6^{\circ}\text{S}$, left part C) and 10°N (left part A), time-latitude section of SOTA in the western Pacific ($120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$, left part B) and the temporal variation of SSTA (SST anomalies) in the Niño3 region (right)

赤道西太平洋的东风异常将驱动暖池次表层的负 SOTA 东传, 并引发 La Niña。在过去的研究中我们已指出, 赤道西太平洋地区的纬向风异常主要是东亚冬季风的异常所激发产生的^[14,27]。赤道西太平洋地区的西(东)风异常会导致暖池区已存在的正(负) SOTA 东传, 当正(负) SOTA 东传到赤道东太平洋并向上扩展到海表, 便引起正(负) SSTa, El Niño (La Niña) 也即爆发; 而东亚/西北太平洋地区的经向风异常(东亚冬季风异常)比赤道西太平洋地区的纬向风异常要出现得更早一些^[28]。图 2 给出的是暖池区的 SOTA 东传到赤道东太平洋海区(5°S~5°N, 170°W~130°W)与赤道西太平洋地区的纬向风异常及与东亚/西北太平洋地区(25°N~35°N, 120°E~140°E)经向风异常间的相关系数的时间变化。对于暖池区的 SOTA 东传到赤道东太平洋海区(ENSO 即将发生), 赤道西太平洋地区的纬向风异常有超前(2~3 个月)的正相关, 而东亚/西北太平洋地区的经向风异常有超前(4~5 个月)的负相关。因此, 主要由异常东亚冬季风所引起的赤道西太平洋地区的纬向风异常是导致暖池区 SOTA 东传的重要机制。

2.2 赤道西太平洋纬向风异常驱动 SOTA 循环的概念模型

在上面个例研究及时间剖面分析的基础上, 我

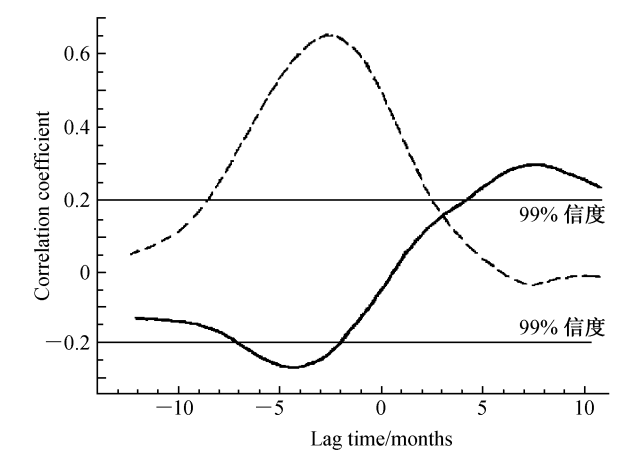


图 2 暖池区 SOTA 东传到赤道东太平洋海区与赤道西太平洋纬向风异常(虚线)以及东亚/西北太平洋地区经向风异常(实线)间的相关系数的时间变化
Fig. 2 Temporal variations of the time-lag correlation of the SOTA propagating eastward along the equator with zonal wind anomalies over the equatorial western Pacific (dashed line) and with meridional wind anomalies over East Asia/the northwestern Pacific (solid line)

们针对 1950 年以来所发生的全部 El Niño 和 La Niña 分别进行了合成分析, ENSO 的循环特征以及热带太平洋 SOTA 的循环和赤道西太平洋纬向风、东亚/西太平洋经向风的演变特征都有与上述个例十分类似的形势。因为篇幅的关系, 这里无法给出合成分析的各个结果(El Niño/La Niña 的前一年、当年及后一年各月的形势), 但根据那些结果可以简要给出几张示意图, 它完全反映了在异常东亚冬季风所引起的赤道西太平洋异常纬向风驱动下热带太平洋 SOTA 的循环特征, 也可认为是 ENSO 循环的特征(图 3)。

图 3 中仅给出了最为典型和重要的 4 个形态, 图 3a 表明暖池区有正 SOTA, 而赤道东太平洋有负 SOTA, 对应着 El Niño 前期或由 La Niña 向 El Niño 的转变期(一般为冬春季), 如果这时有异常的强东亚冬季风(持续北风异常), 赤道西太平洋西部开始产生西风异常, 暖池正 SOTA 开始向东扩展。随着异常强东亚冬季风的影响, 赤道西太平洋整个出现西风异常, 在其驱动下, 正 SOTA 整个东传到赤道东太平洋, 并导致正 SSTa 和 El Niño 事件的发生(图 3b); 与正 SOTA 由暖池区东传到赤道东太平洋的同时, 负 SOTA 会沿 10°N 和 10°S 纬度带逐渐西传到赤道西太平洋, 并在那里形成主要的负 SOTA 中心; 图 3b 对应 El Niño 发展和成熟期(一般为夏秋季)。图 3c 表示由 El Niño 向 La Niña 的转变期(一般也为冬春季), 西太平洋暖池区有负 SOTA, 而赤道东太平洋为正 SOTA 控制。如果这时东亚冬季风持续偏弱(异常偏南风), 将引起赤道西太平洋异常东风出现在其西部, 暖池区负 SOTA 开始向东扩展。在持续的弱东亚冬季风影响下, 赤道西太平洋整个出现东风异常, 负 SOTA 沿赤道整个东传到赤道东太平洋, 并导致负 SSTa 和 La Niña 的发生(图 3d); 与负 SOTA 由暖池东传的同时, 正 SOTA 由赤道东太平洋沿 10°N 和 10°S 纬度带西传到西太平洋, 并在那里形成正 SOTA 中心, 图 3d 对应 La Niña 的发展及成熟期(一般也为夏秋季)。

3 ENSO 与热带大气季节内振荡异常

虽然 ENSO 循环和热带大气季节内(30~60 天)振荡在时间尺度上具有很大的差异, 前者为年际时间尺度的变化, 后者则属于季节内时间尺度的

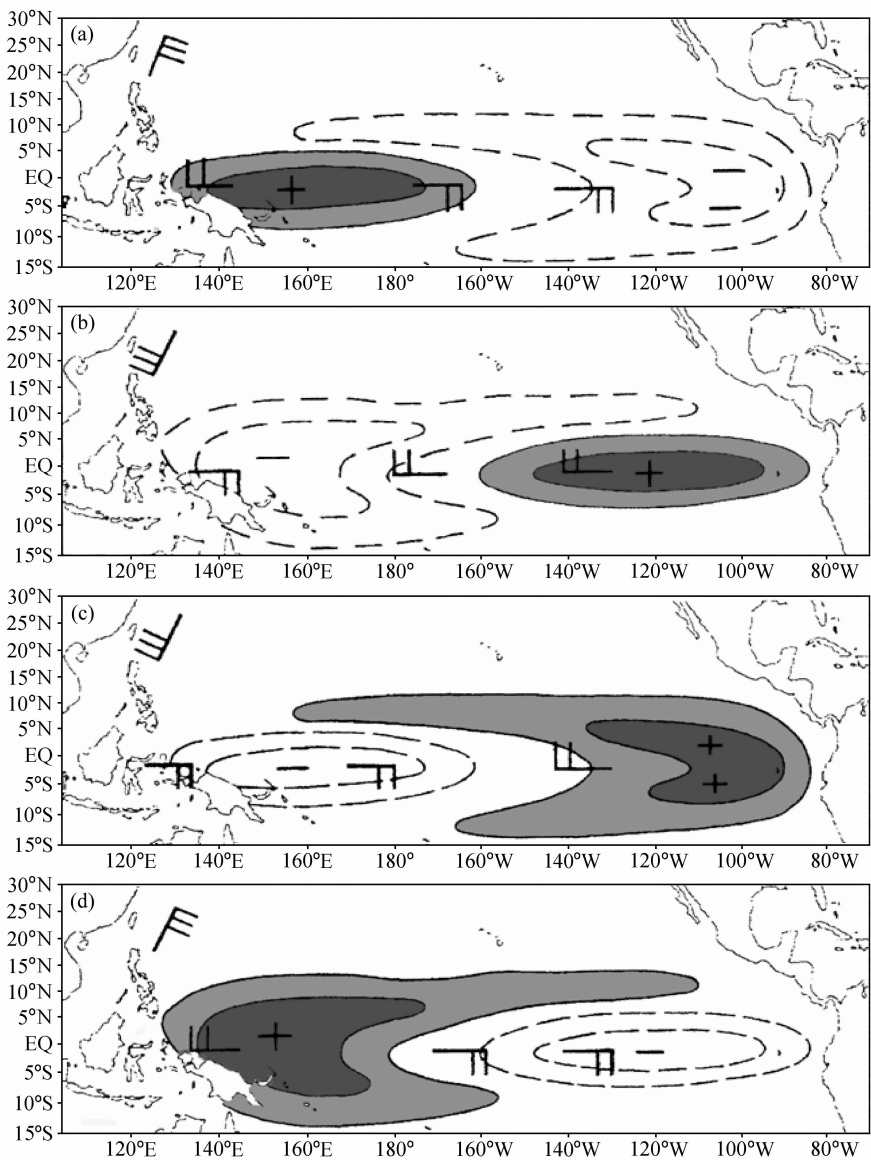


图 3 异常东亚冬季风(风标)及赤道西太平洋纬向风异常(风标)所驱动的热带太平洋 SOTA(阴影: 正距平; 虚线: 负距平)循环的概念模型

Fig. 3 The sketch diagram of the SOTA cycle in the tropical Pacific driven by the anomalies of zonal wind over the equatorial western Pacific and East Asian winter monsoon (shading: positive SOTA; dashed: negative SOTA)

范围,但是一些研究表明,在 El Niño 发生之前热带大气的季节内振荡(ISO)异常活跃,而在 El Niño 期间,ISO 则相对偏弱^[29]。强的热带大气 ISO 可导致热带太平洋地区的西风爆发,进而激发出异常海洋的 Kelvin 波和 El Niño 事件;同时,热带大气 ISO 的明显年际变化,作为一种外部强迫,可能是 ENSO 循环的非周期性的主要原因^[30]。

3.1 热带大气 ISO 的年际异常与 ENSO 的关系

在这里我们将首先从动能角度研究热带大气

ISO 的年际变化及其与 ENSO 循环之间的关系。在低频动能的气候平均图上,热带印度洋为一纬向带状大值中心,从冬到夏由南印度洋向北印度洋移动,且其位置与气候的纬向偏西风的位置相一致(图略)。但是,热带大气的低频动能的年际变化最强的区域却主要集中在热带太平洋地区。图 4 给出了热带大气标准化低频动能的方差(近似代表热带大气低频动能的年际变化)分布,其中阴影部分代表标准方差大于 0.9 的区域,从图中可以看出,尽

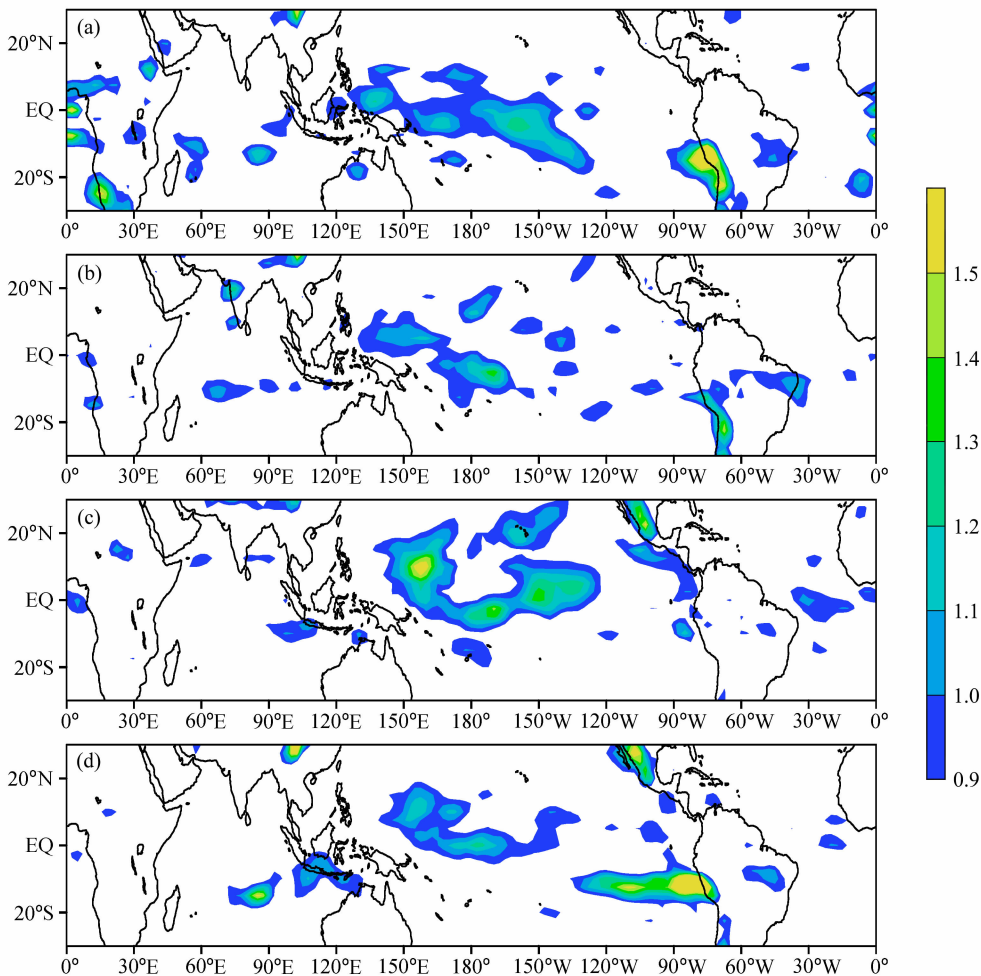


图 4 850 hPa 标准化热带大气季节内振荡动能的标准差分布: (a) 12~2 月平均; (b) 3~5 月平均; (c) 6~8 月平均; (d) 9~11 月平均。
阴影: 标准方差大于 0.9

Fig. 4 Distribution of normalized variance of normalized tropical atmospheric low-frequency kinetic energy: (a) Dec - Feb; (b) Mar - May; (c) Jun - Aug; (d) Sep - Nov. The areas with variance above 0.9 are shaded

管在印度洋地区有零星的大于 0.9 的区域, 但整片大于 0.9 的区域却位于赤道中西太平洋, 这与热带大气的低频动能的气候分布有着明显的不同。因此, 热带中西太平洋地区可能在热带大气低频振荡的年际变化中起着十分重要的作用。

由于 Niño3.4 区域的 SSTA 常用来描述 ENSO 循环, 而 ENSO 的成熟时间在 11 月左右, 因此我们先计算 10~12 月平均的 Niño 3.4 区域的 SSTA, 可得到 40 年 SSTA 的时间序列, 然后以此时间序列与全球低频动能计算其相关。从相关系数的分布 (图略) 可以看出, 在 El Niño 成熟之年的前冬, 低频动能与 SSTA 的相关显著性较差, 而在 El Niño 成熟之前的春、夏季两者的相关较为明显, 且相关区随着低频动能的正距平中心一起逐渐东移, 当 El

Niño 成熟之后, 其相关又明显减弱。这些结果表明, 春、夏季热带西太平洋大气 30~60 天低频振荡的异常可能在 El Niño 的形成中起着重要作用。

为了更进一步说明赤道西太平洋大气 30~60 天低频动能与 El Niño 的关系, 我们选择 1965~1966、1972~1973、1982~1983、1986~1987、1997~1998 年五个强 El Niño 事件, 对低频动能进行合成分析。图 5 给出 Niño3.4 区域平均 SSTA 与赤道西太平洋 (10°S~10°N, 130°E~180°) 大气 30~60 天低频动能距平的合成演变图, 其中横坐标的 (-1)、(0) 和 (+1) 表示 El Niño 爆发的前一年、当年和后一年, 虚线所示的 Niño 3.4 区域 SSTA, 清楚反映了 El Niño 的演变形势; 而 Niño 3.4 区 SSTA 与实线所示的赤道西太平洋大气 ISO

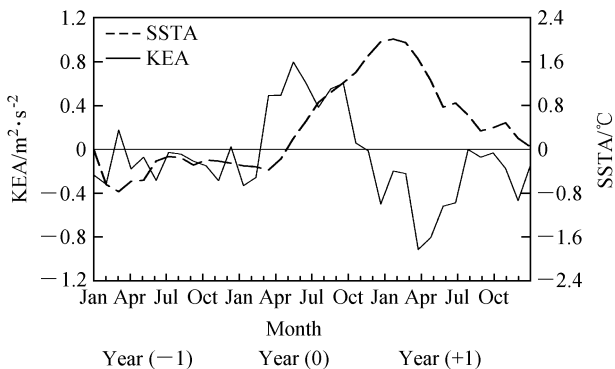


图5 合成的 Niño 3.4 区平均 SSTA 及赤道西太平洋大气 ISO 动能距平 (KEA) 的时间演变

Fig. 5 Composite results of the SSTA in the Niño 3.4 region and the 30–60 day low-frequency kinetic energy anomaly (KEA) over the equatorial western Pacific

动能的演变相比较可以清楚看出, 在 El Niño 成熟之前的春、夏季, 赤道中西太平洋地区的大气低频动能出现明显正异常, 当 El Niño 成熟以后, 低频动能明显减弱。这里的结果与我们利用欧洲中心资料分析的 1980 年代 El Niño 与热带大气 ISO 之间的关系结论相一致^[31]。因此可以认为, 热带大气 30~60 天低频振荡的年际变化与 ENSO 循环之间确实存在着明显的相互作用关系。

需要特别指出的是, 积云对流 (湿过程) 与热带大气 30~60 天低频振荡是相互作用的。如果积云对流偏强, 热带大气 30~60 天低频振荡也将偏强; 而这种异常的 30~60 天低频振荡对周围的大气环流有正反馈作用, 从而导致积云对流的进一步加强, 强的积云对流又会引起赤道西风异常, 并导致 Walker 环流的异常, 有利于 El Niño 的形成。分析 850 hPa 纬向风异常与 ISO 动能距平的合成 (图略), 我们将可以看到, 较大的 ISO 动能正距平在冬季首先出现在热带西太平洋地区, 随后逐渐加强并缓慢沿赤道东移; 与赤道西太平洋 ISO 动能距平中心相对应, 在赤道西太平洋地区有西风异常、以及异常西风的加强和向东扩展。因此可以认为, 热带大气 30~60 天低频振荡的年际变化作为一种外强迫, 可能在 El Niño 的形成过程中起着十分重要的作用; 热带大气 30~60 天低频振荡与周围环境的相互作用使赤道西太平洋地区的西风异常得以维持、加强并向东扩展, 从而对 El Niño 的形成有重要作用。

3.2 热带大气 ISO 纬向移动与 ENSO 的关系

就其纬向移动来讲, 热带大气 ISO 在赤道附近主要表现为东传特征, 但不时也可以看到大气 ISO 西传的情况。而且一般情况下赤道大气 ISO 的纬向移动有明显的年变化特征, 在冬半年大气 ISO 的东传十分明显, 但在夏季 ISO 的移动性不明显。一些个例的分析又表明, 赤道大气 ISO 的显著系统性东传与 El Niño 事件的发生有一定关系。对 1955 年以来在 El Niño 年和 La Niña 年赤道大气 ISO 的主要纬向移动特征的进一步系统分析表明, ENSO 与赤道大气 ISO 的纬向移动有明显关系。因篇幅关系, 这里将只分别给出 4 个 El Niño 年和 4 个 La Niña 年的典型形势的分析结果, 各年虽有一些不同, 但大体有相近的特征。

图 6 是 4 个 El Niño 年 (1965、1982、1987 和 1997 年) 200 hPa 上赤道大气 ISO 的 u 分量的时间-经度剖面。850 hPa 有类似情况, 但 200 hPa 振幅大一些, 移动特征更显著, 故用了 200 hPa u 分量进行分析。从图 6 可以看到, 赤道大气 ISO 在 El Niño 年不仅在冬半年东传十分显著, 而且在夏季也表现出明显的东移。与一般情况相比较, 大气 ISO 明显的系统性东传的确同 El Niño 的发生有关。

图 7 给出了 4 个 La Niña 年 (1967、1970、1988 和 1998 年) 200 hPa 上赤道大气 ISO 的 u 分量的时间-经度剖面。与图 6 相比较, 除了秋冬季大气 ISO 的东移不如 El Niño 年之外, 最为突出的是夏季大气 ISO 的纬向移动是以西传为主, 尽管系统性没有东传那么清楚。也就是说, 赤道大气 ISO 在夏季的西传同 La Niña 的发生有一定关系。

4 El Niño 持续时间与大气环流异常

大家知道, El Niño 具有不同的生命长度, 大部分 El Niño 事件在春季爆发后会持续一年时间, 在第二年春季结束; 然而也有一部分 El Niño 事件可持续较长时间, 在第三年春季才结束。为什么有的 El Niño 能维持更长的时间 (二年), 而相当多的 El Niño 却只维持一年时间, 它们各自依赖于什么样的大气状态和条件, 或者说什么样的大尺度环流背景与 El Niño 事件的维持时间有关, 是需要我们回答的问题。

利用 NCEP/NCAR 再分析资料和英国 Hadley

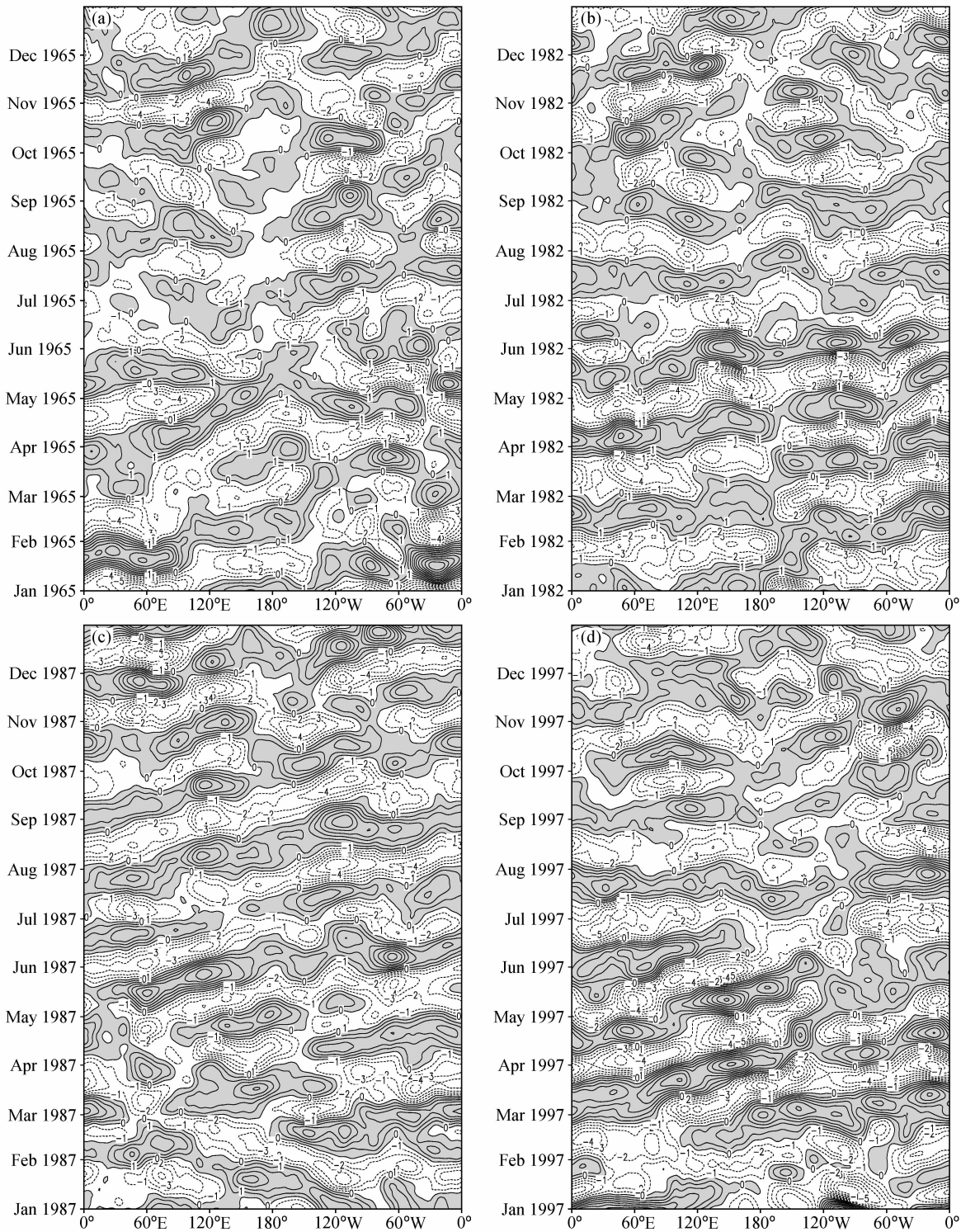


图 6 El Niño 年 200 hPa 大气 ISO ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 平均) 的 u 分量的时间-经度剖面: (a) 1965 年; (b) 1982 年; (c) 1987 年; (d) 1997 年。等值线间隔: 1 m/s

Fig. 6 Time-longitude sections of ISO u -component averaged from 10°S to 10°N at 200 hPa for El Niño years (contour interval: 1 m/s): (a) 1965; (b) 1982; (c) 1987; (d) 1997

中心月平均海温资料, 对 1955~2000 年期间较强 El Niño 事件为研究对象, 根据 Niño 3 区海温距平 (图略) 大于或接近 0.5°C 的持续时间大 (等) 于 16 个月定义长持续时间 El Niño, 取 1968、1982 和

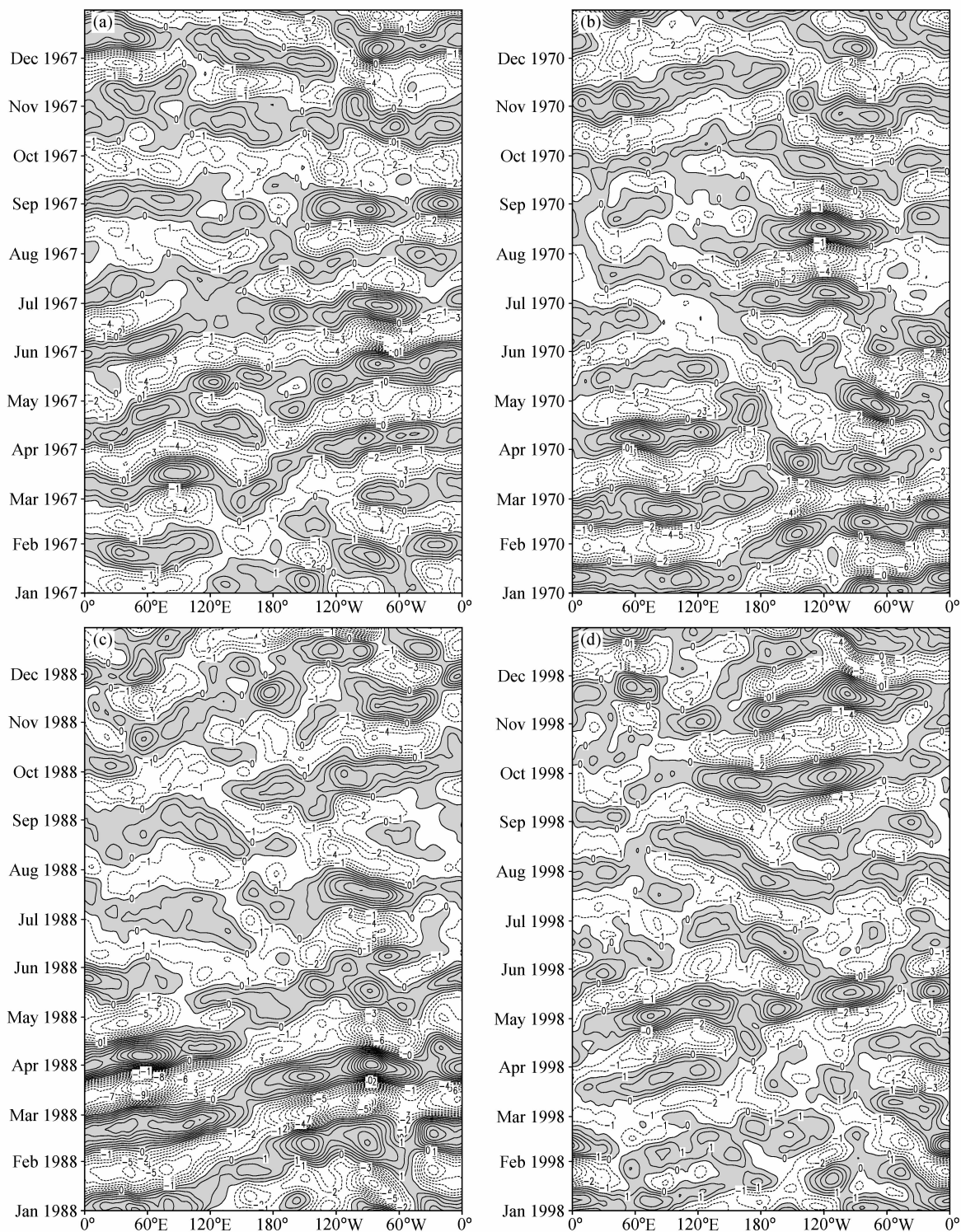


图7 同图6, 但为 La Niña 年: (a) 1967 年; (b) 1970 年; (c) 1988 年; (d) 1998 年

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for La Niña years: (a) 1967; (b) 1970; (c) 1988; (d) 1998

1986 年作为长持续时间 El Niño 事件, 而取 1957、1965、1972、1991 和 1997 年作为短持续时间 El Niño。对不同持续时间 El Niño 过程进行的大气环

流合成分析, 可揭示它们各自对应的大气环流演变特征, 以及大气环流异常特征与 El Niño 持续时间的关系。其主要结果可归纳如下几点:

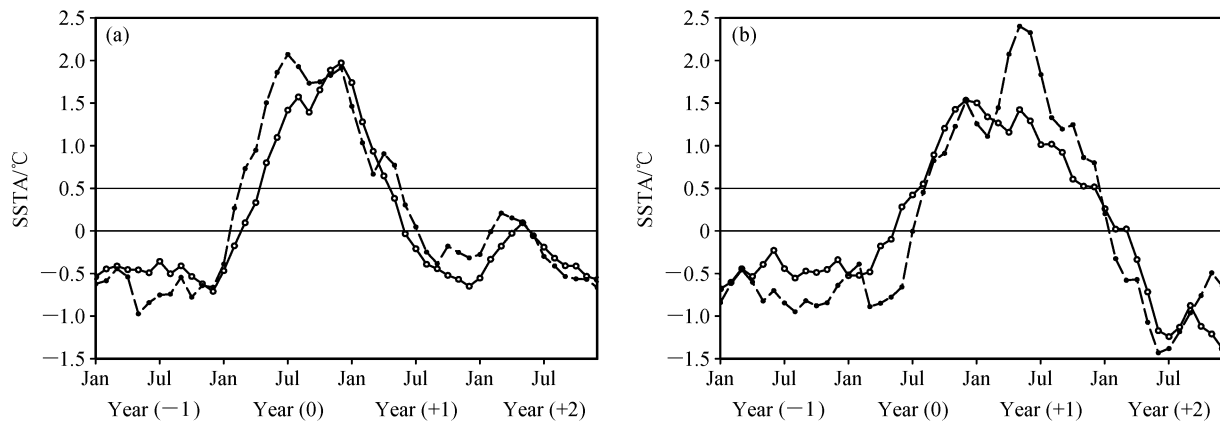


图 8 短持续时间 (a) 和长持续时间 (b) El Niño 事件合成的海温距平在 Niño3 区 (实线) 和 Niño1+2 区 (虚线) 的时间演变(单位: $^{\circ}\text{C}$)。-1 年: El Niño 爆发前一年; 0 年: 爆发年; +1 年, 爆发后一年; +2 年: 爆发后二年

Fig. 8 Composite time series of monthly SSTA ($^{\circ}\text{C}$) in the Niño3 (solid line) and Niño1+2 (dashed line) regions for (a) short-lasting and (b) long-lasting El Niño events. -1, 0, +1 and +2 identify the preceding year, the onset year, the next year, the year after the next year of El Niño

(1) 两种 El Niño 事件开始时间比较接近, 但结束时间相差半年左右 (图 8)。长持续时间 El Niño 的强度一般比短持续时间的 El Niño 的强度偏弱, 而所对应的东亚/西北太平洋地区的北风异常偏强和赤道西太平洋的西风距平维持时间偏长。因此, 西太平洋赤道西风异常的发生和维持是 El Niño 发生和维持的重要条件, 而西太平洋赤道东风异常的发生是 El Niño 消亡的重要条件。

(2) 对应不同持续时间的 El Niño 的发生发展和消亡过程, 对流层低层风场距平有极显著的演变差异。850 hPa 上东北太平洋和西北太平洋异常气旋性环流的发展和活动对 El Niño 事件的发生起着重要作用。而东北太平洋上异常气旋性环流的减弱和西北太平洋上异常反气旋性环流的增强, 从而导致赤道西太平洋东风异常发展, 对 El Niño 的消亡起着重要作用。在持续时间较长的 El Niño 事件中, 东北太平洋上异常气旋性环流减弱和西北太平洋上异常反气旋性环流距平涡旋增强都比较慢, 此外在 El Niño 衰减期, 澳洲冬季风加强, 夏季风偏弱, 从而赤道西太平洋西风异常维持的时间较长, 有利于 El Niño 的维持。图 9 与图 10 分别给出了两种 El Niño 事件所对应的当年冬季、第二年春季和夏季合成的 850 hPa 流场的演变, 上述特征可以从图 9 与图 10 的比较中清楚地看到。

对应短持续时间 El Niño 事件, 其冬季大气环流状况表现为北太平洋上空的异常气旋性环流加强东移, 与此相伴在热带中、东太平洋的西风异常增

强; 随着西北太平洋的异常反气旋性环流进一步加强、范围扩大, 受其影响在该异常反气旋性环流南部的赤道西太平洋地区出现东风异常, 并在东亚/西北太平洋出现较强的南风异常, 表示冬季风减弱。El Niño 爆发后一年的春季, 东亚仍为南风异常, 东北太平洋上异常气旋性环流减弱, 其南面的赤道西风异常减弱。到 El Niño 爆发后一年的夏季, 西北太平洋异常反气旋性环流进一步增强, 范围向东扩展, 致使该异常反气旋性环流南面的赤道东风异常东移到赤道东太平洋上, 并对应着 El Niño 的结束。因此, 东北太平洋上异常气旋性环流衰弱, 以及西北太平洋异常反气旋性环流和西太平洋上东风异常的增强东移是 El Niño 结束的重要条件。

对于长持续时间 El Niño 事件, El Niño 爆发后的冬季, 风场距平特征和短持续时间 El Niño 事件的距平分布非常相似, 但赤道西风异常强度稍弱, 这可能是持续时间长的 El Niño 其强度不如持续时间短的 El Niño 强的原因。与短持续时间 El Niño 比较, 东北太平洋上空的异常气旋性环流要强, 而西北太平洋的异常反气旋性环流要弱。在 El Niño 爆发后一年的春季, 东亚也为南风异常, 但东北太平洋上空的异常气旋性环流仍然较强, 这可能是 El Niño 维持时间较长的原因之一。在 El Niño 爆发后一年的夏季, 东北太平洋上异常气旋性环流仍然较强, 但西北太平洋的异常反气旋性环流较弱, 因而其南侧的东风异常不能南移到赤道洋面;

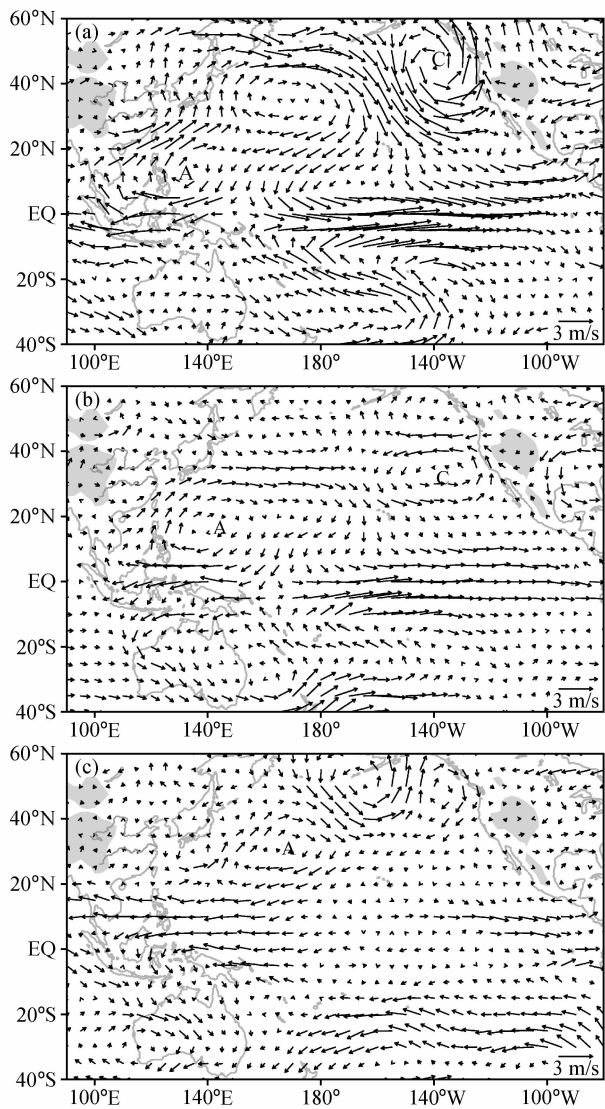


图9 短持续时间 El Niño 所对应的 850 hPa 异常风场的演变: (a) 爆发年冬季; (b) 后一年春季; (c) 后一年夏季。A: 反气旋环流; C: 气旋性环流

Fig. 9 Composites of 850-hPa wind field anomalies for the short-lasting El Niño events in (a) the winter of the onset year, (b) the spring of the next year, (c) the summer of the next year. A and C are anticyclonic and cyclonic circulation anomalies, respectively

此外, 澳洲冬季风偏强, 受其影响赤道太平洋的西风异常仍然比较强。

(3) 东亚地区 200 hPa 速度势正距平南下对 El Niño 事件的发生起着重要作用, 西太平洋上速度势正距平东移对 El Niño 的消亡起重要作用。对应持续时间较短的 El Niño 事件, 在西太平洋 200 hPa 上的速度势正距平迅速东移对 El Niño 的迅速消亡起重要作用; 对持续时间较长的 El Niño 事件, 中

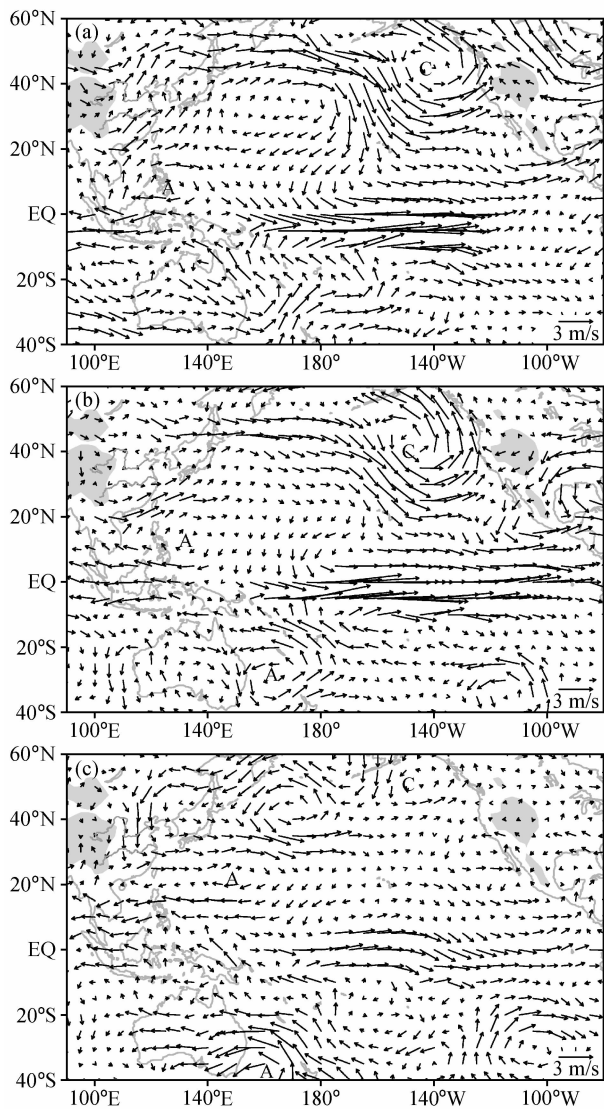


图10 同图9, 但为长持续时间

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for the long-lasting El Niño events

太平洋速度势负距平的发展和维持以及南半球西太平洋速度势正距平的维持对 El Niño 的持续起重要作用, 因为这种速度势距平分布极其有利于维持同 El Niño 相伴随的 Walker 环流形势。

5 ENSO 可预报性研究

5.1 ENSO 事件“最优前期征兆”问题的研究

ENSO 事件的“最优前期征兆”是最容易发展成 ENSO 事件的初始信号。如果用统计学信噪比度量可预报性, 该信号发展成的 ENSO 事件具有最强的可预报性。国际上许多研究用线性奇异向量 (LSV) 研究该问题, 但海气系统的非线性限制了线性奇异向量的适用性。Duan 等^[22]使用 Mu 等^[21]

提出的条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法, 揭示了最容易发展成 ENSO 事件的前期征兆 (最优前期征兆): 即赤道东太平洋负 (正) 的海表温度距平和正 (负) 斜温层深度距平最容易发展成 El Niño (La Niña) 事件。该理论结果解释了斜温层变化领先于海表温度变化的观测事实, 在一定程度上支持了 Li 和 Mu^[32] 关于 El Niño 前期信号的资料分析结果, 从物理上阐明 ENSO 最优前期征兆形成及其发展成 ENSO 事件的机制。通过与线性奇异向量结果的比较, 克服了 LSV 的局限性, 揭示了非线性的影响, 即非线性温度平流过程促进 El Niño 而抑制 La Niña 的发展, 造成了 ENSO 事件在强度上的不对称性。该结论为 ENSO 的非线性理论提供了一个有力证据。

5.2 ENSO 事件“春季可预报性障碍”问题的研究

ENSO 事件的“春季可预报性障碍” (SPB) 问题是 ENSO 可预报性研究的一个重要内容。国际上许多研究探讨了 ENSO 事件的 SPB 问题, 但 SPB 产生的机制至今仍扑朔迷离, 具有很大争议。

Mu 等^[23, 24] 使用 CNOP 方法揭示了 ENSO 事件的“春季可预报性障碍”现象; 对于所用理论模式, 找出了最容易导致春季可预报性障碍的初始误差模态, 弄清耦合过程的非线性在 ENSO 春季可预报性障碍研究中的重要作用, 提出了关于春季可预报性障碍的一种可能机制, 从而拓展 Webster 和 Yang^[25] 关于春季可预报性障碍机制的解释。

关于“春季可预报性障碍”的机制: 所用模式之所以发生春季可预报性障碍, 依赖三方面的综合作用: (1) 季节循环在春季具有强的海气耦合不稳定性; (2) El Niño 在春季具有强的动力学不稳定性 and 最弱的持续性; (3) El Niño 初始误差的发展与 El Niño 事件本身在春季具有相同的增长机制。

考虑到上述所用模式的简单性, Mu 等^[33] 进一步用 Zebiak-Cane 模式研究 ENSO 暖事件误差增长的季节依赖性。所得结果支持 Mu 等^[24] 的结果, 强调了初始误差模态结构的重要性, 即 CNOP 型误差导致显著的春季可预报性障碍现象 (图 11), 同时存在一些非 CNOP 型初始误差 (图 12), 它们既没有明显的季节依赖性发展, 又对 El Niño 预报结果影响不大。另外, CNOP 方法揭示了 El Niño CNOP 型初始误差具有局地性的空间结构。该结果实际上反映了该地区观测资料的精度在 ENSO 预

测中的重要性。

上述无论理论模式还是中等复杂程度模式, 它们的结果都强调了 CNOP 型初始误差在 ENSO 事件春季可预报性障碍研究中的重要性, 即, 如果初始误差不是 CNOP 类型, ENSO 预测可能具有相对较高的可预报性。这些结论解释了为什么一些作者认为 ENSO 预测发生春季可预报性障碍, 而 Chen 等^[34, 35] 则指出春季可预报性障碍能够通过改善模式初始场而减弱, 甚至被消除。可见, CNOP 型初始误差的模态结构对于 ENSO 预测的不确定性有重要的影响, 如果用一种资料同化方法可以滤掉该类误差, 那么 ENSO 预报技巧应该会提高。基于这一点, 可以把上述理论结果作为用资料同化方法进行 ENSO 预测的理论基础。另外, CNOP 型初始误差的局地性也激励我们用 CNOP 方法确定导致 ENSO 预测不确定性的最敏感区域, 这方面的研究属于“target observation”的研究。

5.3 ENSO 可预报性的量化研究

采用非线性优化方法, 建立关于 ENSO 事件的最大可预报时间下界、最大预报误差和最大允许初始误差上界的非线性优化问题^[26]。首先, 对于给定的初始观测误差界和最大允许预报误差 (预报精度), 可以得到 El Niño 和 La Niña 事件的最大可预报时间的下界。进一步比较 El Niño 和 La Niña 事件的可预报性表明: El Niño 事件在初始观测误差界充分小的情况下, 随着最大允许预报误差范围的逐渐变大, 模式可以跨过春季在允许的误差范围内对 El Niño 作较长时间的预测; 对于较大的初始观测误差界, 模式无法跨过春季在允许的预报误差范围内预测 El Niño 事件, 其最大预报时效总是停滞在 4~6 月间。对于 La Niña 事件, 在所允许的预报误差范围内, 它可以跨过春季作长时间的预测, 不发生春季可预报性障碍的现象。其次, 计算 El Niño 和 La Niña 事件在预报时刻的最大预报误差, 其结果表明: 对于给定的最大允许预报误差, 当海表温度距平初始观测误差界小于一个确定的门槛值时, 模式可以跨过春季预测 El Niño 的发展; 当初始观测误差界超出此定值范围时, 模式则不能跨春季预测 El Niño 事件。但用切线性模式估计误差的信息却高于非线性估计, 也就是说, 当初始海表温度距平误差界超出该定值一定范围时, 模式仍然可以跨春季预测 El Niño 事件。所以, 在假定非线性

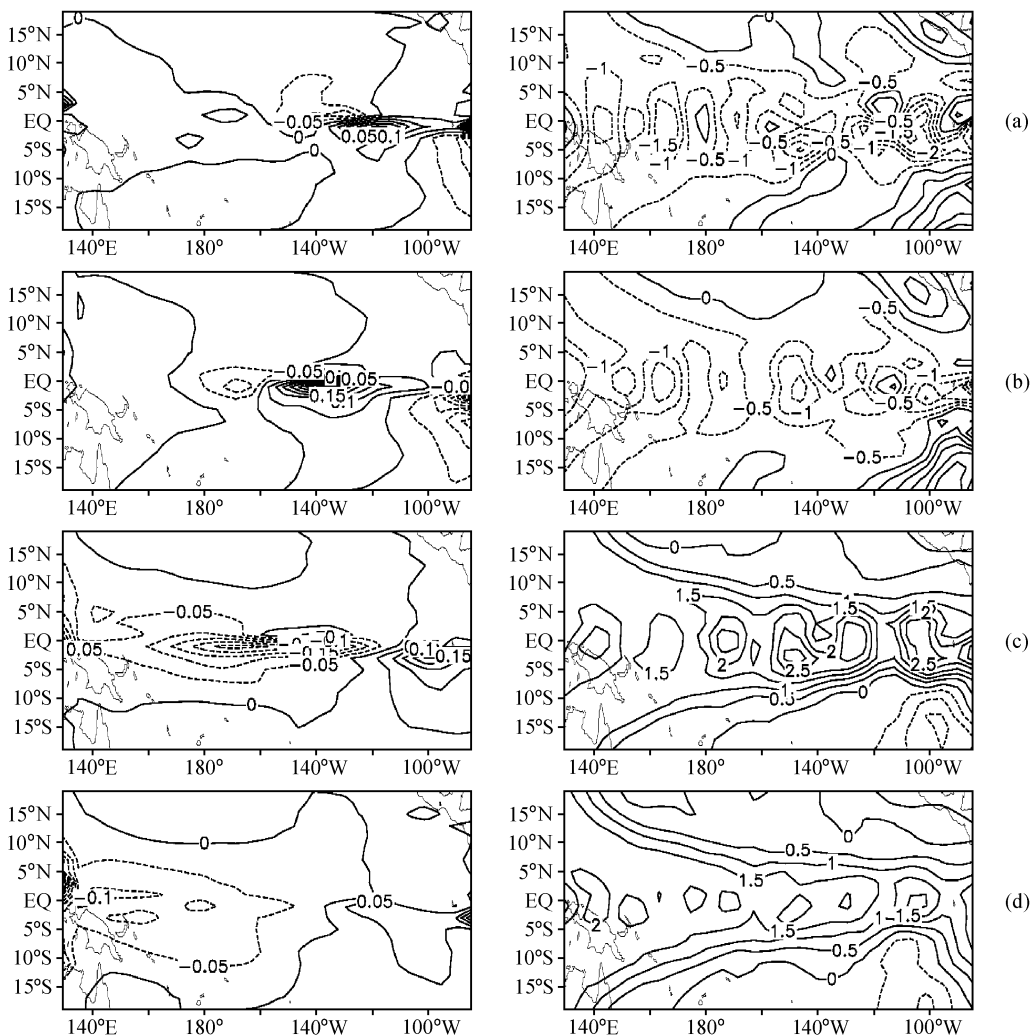


图 11 CNOP 型初始误差: SSTA 分量 (左列) 和斜温层深度距平分量 (右列)。初始时间: (a) 1 月; (b) 4 月; (c) 7 月; (d) 10 月

Fig. 11 CNOP-type initial errors for SSTA (left, $^{\circ}\text{C}$) and thermocline depth anomaly (right, m) components. Initial times are respectively (a) Jan, (b) Apr, (c) Jul, (d) Oct. CNOP-type errors cause a significant spring predictability barrier

模式反映真实 ENSO 事件的情况下, 切线性模式是对非线性模式的近似, 其估计误差的结果只能近似刻画 ENSO 的预报误差, 不能定量反映非线性模式的误差发展。对于 La Niña 事件, 当其与 El Niño 事件具有相同初始观察误差界时, 模式能够从不同时刻, 在上述允许的预报精度范围内跨春季预测 La Niña 事件。第三, 讨论了模式能够跨春季预测 ENSO 时, 初始条件最大允许初始观察误差界应该满足的条件, 从另一个角度刻画了 El Niño 事件的春季可预报性障碍现象。

5.4 El Niño 事件和 La Niña 事件强度不对称性问题的研究

ENSO 不对称性问题是一个公开未解决的问题。Duan 等^[36]用中等复杂程度 Zebiak-Cane

(1987) 模式, 考察了不同非线性过程, 即非线性温度平流、次表层温度参数化、以及风应力, 对 ENSO 强度不对称性的影响。结果表明, 非线性温度平流过程显著促进 El Niño, 而微弱影响 La Niña 强度, 造成 El Niño 强、La Niña 弱的 ENSO 不对称性; 次表层温度参数化的非线性则倾向于较小地抑制 El Niño, 而较大地抑制 La Niña, 也造成一种 El Niño 强、La Niña 弱的不对称性, 但这种不对称性较弱; 风应力的非线性易导致另外一种不对称性, 即 El Niño 弱, La Niña 强, 该不对称性也比较弱, 并且可以被由次表层温度参数化导致的不对称性抵消; 这样, ZC 模式的三种非线性过程中, 非线性温度平流在 ENSO 不对称性中起着决定性的作用。

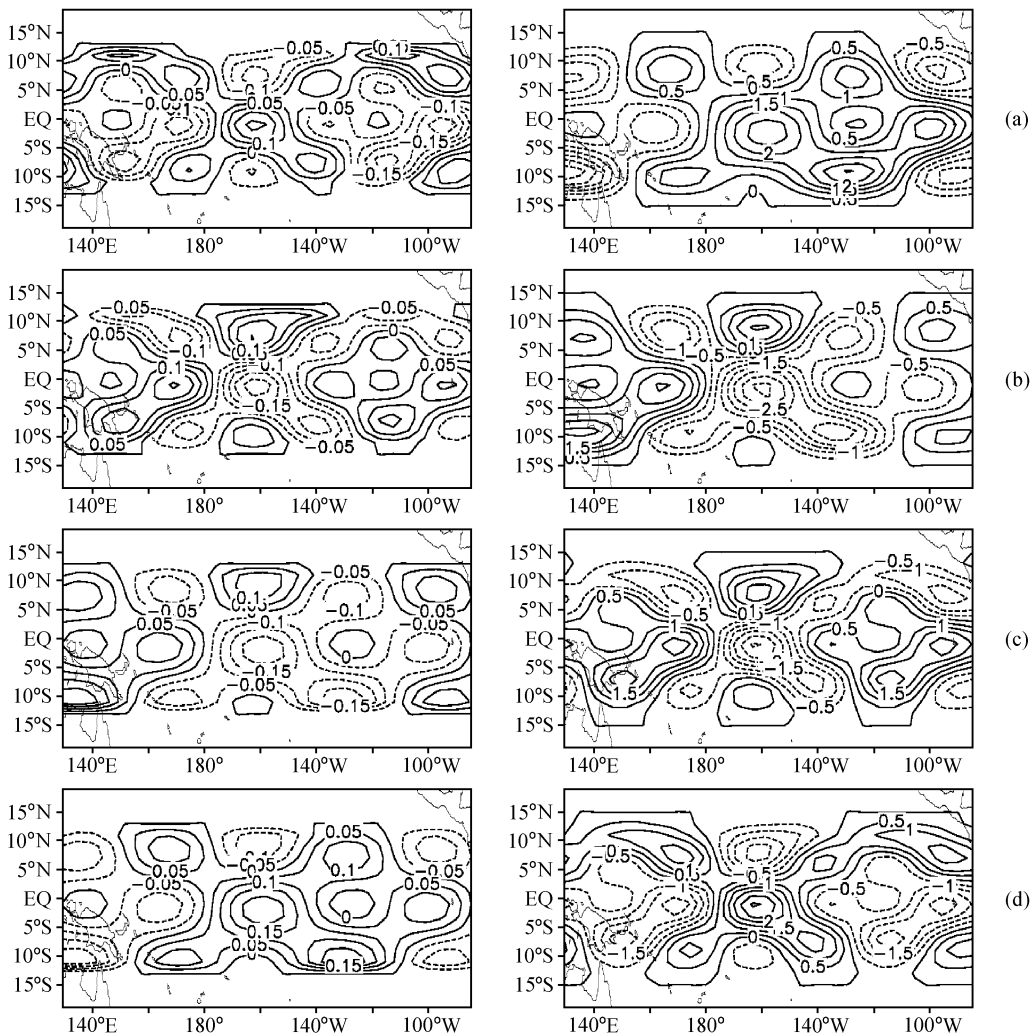


图 12 同图 11, 但为非 CNOP 型初始误差: (a) 误差 1; (b) 误差 2; (c) 误差 3; (d) 误差 4。初始时间为 1 月

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for Non-CNOP type errors: (a) Error 1; (b) error 2; (c) error 3; (d) error 4. Initial time is Jan

6 ENSO 预测试验研究

6.1 海洋资料同化系统

周广庆等^[37, 38]利用大气所热带太平洋和全球大气耦合环流模式, 设计了“气候异常”初始化方案并进行十几年的系统性后报检验, 建立了 IAP ENSO 预测系统。但该预测系统的初值仍是通过海表界面的强迫场产生, 因此海洋次表层异常信息是通过模式响应产生的并在模式中被低估, 其所导致的预测结果表现为在预测开始的头几个月, 模式预测技巧比持续性技巧还低。解决这一问题的方法就是发展海洋同化系统, 利用资料同化方法把海洋温盐剖面观测信息直接融合到预测模式中。为此, 周广庆和李旭^[39]发展了一个三维变分海洋资料同化

系统, 但该系统只包含对温度剖面资料的同化。考虑到海表高度计卫星资料可提供很高的时空覆盖率以及盐度信息对 ENSO 预测的作用, Zhu 等^[40]和 Yan 等^[41]提出温盐非线性约束关系, 将卫星高度计资料分解到温盐垂直剖面。在此基础上, 朱江等^[42]发展了一个通用的海洋变分资料同化系统 IAP OVALS, 该系统可以同时同化温、盐剖面资料和卫星高度计资料进行同化。利用 IAP ENSO 预测系统和海洋资料同化系统 (OVALS), 研究了海洋资料同化在 ENSO 预测中的应用。通过三组试验, 比较了同化完整观测资料 and 同化观测距平资料对 ENSO 预测的作用, 连续 18 年 (1982~1999 年) 后报试验表明三组试验都能较好地预测出这段时期主要的强事件, 尤其是在预测开始的头几个月, 预

测技巧可提高 0.1, 并均高于持续性技巧, 但预测的强度普遍不够 (图 13)。距平同化相对其他两种方案预测效果略好, 预测的强度也加强, 尤其是对 1980 年代的 ENSO 预测明显偏好, 但在对 1991~1995 阶段的预测水平仍较低, 这与国外的结果类似。

6.2 次表层上卷海温参数化方法

Latif 等^[43]、AchutaRao 等^[44]和 Davey 等^[45]在总结国际上几十个海气耦合模式时发现, 目前还没有一个海气耦合模式能够把 ENSO 的所有特征都模拟出来, 其中突出的问题表现为模式对赤道东太平洋靠近美洲沿岸温度异常的模拟普遍偏低, 耦合模式模拟的年际变律以准两年周期为主。一些研究表明, 海洋中夹卷过程 (entrainment) 及垂直扩散过程存在较严重偏差^[46~48], 并导致在赤道东太平洋地区温跃层变化对混合层温度影响不够, 从而使 OGCM 模拟的东太平洋 SSTA 振幅偏弱, 相应的耦合模式中振荡周期偏短。Zhang 等^[49]提出一种描述次表层上卷海温的非局地参数化方法, 有效地改进了中等复杂程度耦合模式的 ENSO 模拟水平。朱杰顺等^[50]将这一方案引进到大气所的热带太平洋环流模式, 通过在 OGCM 中嵌入海表距平模式并利用经验方法将海洋上混合层底部海温变化与海表面起伏联系起来, 从而可以方便地利用模式模拟的海表起伏描述温跃层的变化情况及其对混合层海温变化的影响。三组数值试验表明通过上述方法显著改善了 SST 年际变化的模拟, 在赤道东太平洋

及南美沿岸, 距平相关系数由原来的 0.7 左右提高到 0.8 以上, 均方根误差在赤道东太平洋由原来 0.8℃ 降到 0.6℃, 在南美沿岸由 1.3℃ 以上降为 0.9℃。在此基础上, 通过与一个统计大气模式耦合建立了一个混合型热带太平洋海气耦合模式, 通过对比采用该参数化方案前后模拟的年际变化, 发现其周期由准两年振荡变为准 4 年周期, 在赤道东太平洋海温距平振幅显著增大, 分布形式与观测更为接近, 而且还能模拟出观测中 ENSO 振荡的季节依赖性特征。进一步, 利用这个改进的混合型海气耦合模式进行 21 年 (1982~2002 年) 的 ENSO 后报试验, 结果显示改进后的模式的预报水平整体上明显高于改进前, 距平相关系数提高了 0.1~0.2; 在改进前预报时效与持续性预报相当, 只有大约 5~6 个月, 而改进后预报时效能提高到 9 个月, 延长了 3~4 个月。在空间分布上, 与改进前的模式偏差相一致, 其预报较高技巧区仅集中在赤道两侧很窄的一个带状区域内, 并在赤道东太平洋到美洲沿岸急剧下降; 而使用了次表层上卷海温 (T_e) 参数化方案后, 模式预报在这方面的问题也有了显著改进 (图 14)。

6.3 ENSO 跨季度集合预测

集合预测是气候预测的发展方向。目前关于 ENSO 的跨季度集合预测, 开展的相对比较少, 很多原理和方法都借鉴大气中所用到的集合方法。Zheng 等^[51]结合一个太平洋区域中等复杂程度海气耦合模式 (Intermediate Coupled Model, ICM),

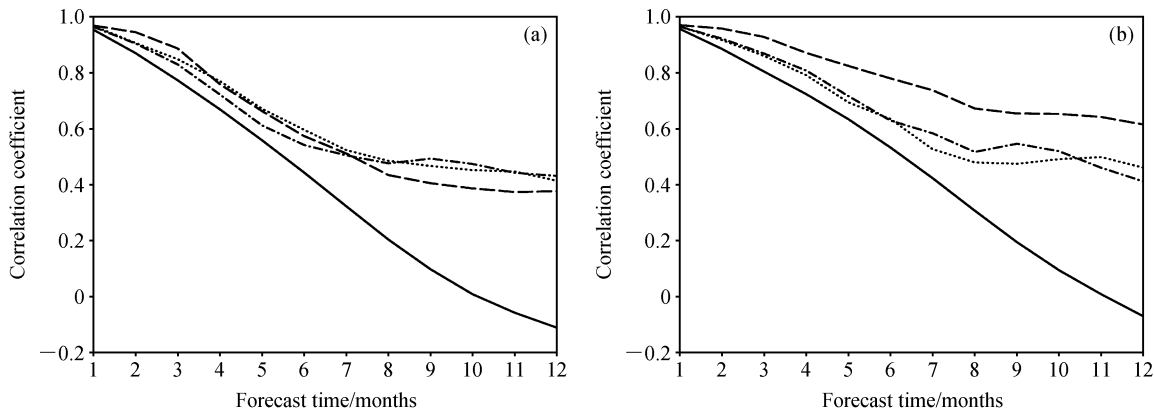


图 13 不同的同化方案预报 Niño 3 区相关技巧: (a) 1982~1999 年平均; (b) 1982~1990 年平均。点线、点虚线: 同化温度剖面资料 (但所采用的风应力不同); 虚线: 同化温度剖面距平资料; 实线: 持续性结果

Fig. 13 The correlation between observed and forecasted temperature anomalies in the Niño3 region by different assimilation schemes: (a) 1982-1999 mean; (b) 1982-1990 mean. The dotted and dot-dashed lines show the results from assimilating temperature profiles directly (using different wind stress), the dashed line shows the results from assimilating temperature anomalies, and the solid line shows the persistent skill

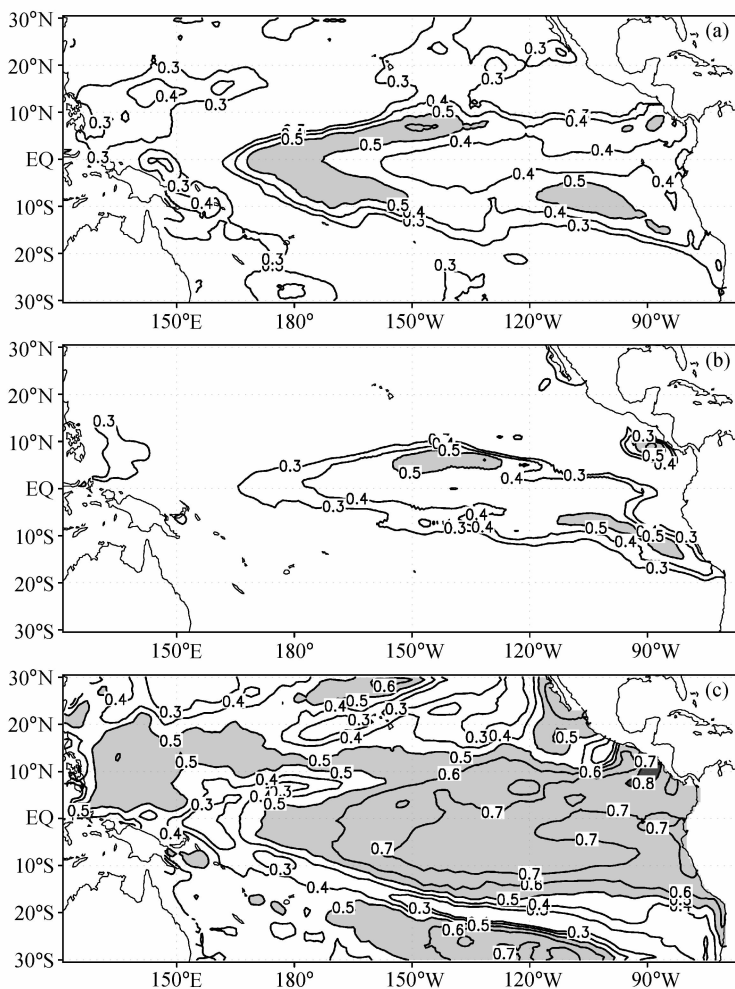


图 14 模式改进前后提前 6 个月预报的海温距平相关系数分布: (a) 持续性相关; (b) 模式改进前的预测相关; (c) 在模式中嵌入考虑次表层上卷海温作用的 SSTA 模式的预测相关

Fig. 14 The distributions of correlation between observed and predicted SST anomalies for advancing 6 months: (a) The persistent correlation; (b) the correlation before model improvement; (c) the results imbedding a SSTA model in which the entrainment of subsurface temperature is parameterized

发展了一个 ENSO 的跨季度集合预测系统。该系统采用集合卡曼滤波 (Ensemble Kalman Filter, EnKF) 同化方法为集合预报系统提供初始的集合样本场, 试验比较表明该同化方法能够为集合预报系统提供比较精确的并与模式相匹配的初值, 同时集合样本的标准差空间分布特征与观测误差的空间分布比较一致, 表明可以保证每个样本的初始场都有同样的可能性代表海气的实际状态 (图 15)。针对模式物理过程的不确定性, 该集合预报系统采用一个一阶线性马尔可夫随机模式来模拟模式模拟过程中所存在的不确定性, 共 100 个集合预报成员。通过一系列确定性和概率检验方法^[52], 该 ENSO 集合预报系统比原有的确定性预报模式的模拟结果

有一定的改善, 同时概率预报也是对确定性预报的一个完善和补充。但是通过分析也发现, 该集合预报系统对热带东太平洋区域预报技巧相对稍差一些。为此, 进一步提出了一种“平衡的”多变量模式误差扰动方法, 使海表温度异常 (SSTA) 资料和卫星高度计 T/P/J 观测在集合资料同化中能够协调的同化入模式。13 年后报试验的统计检验结果表明, “新的” (同时同化 SSTA 和高度计资料) 预报样本均值要比 “原始的” (只同化 SSTA 观测资料) 预报样本均值在相关系数和均方根误差两个方面都有了很明显的改进 (图 16)。在所有的预报月, “新的” 样本均值预报很明显地优于 “原始的” 样本均值预报, 并且, “新的” 样本均值预报在 Niño3

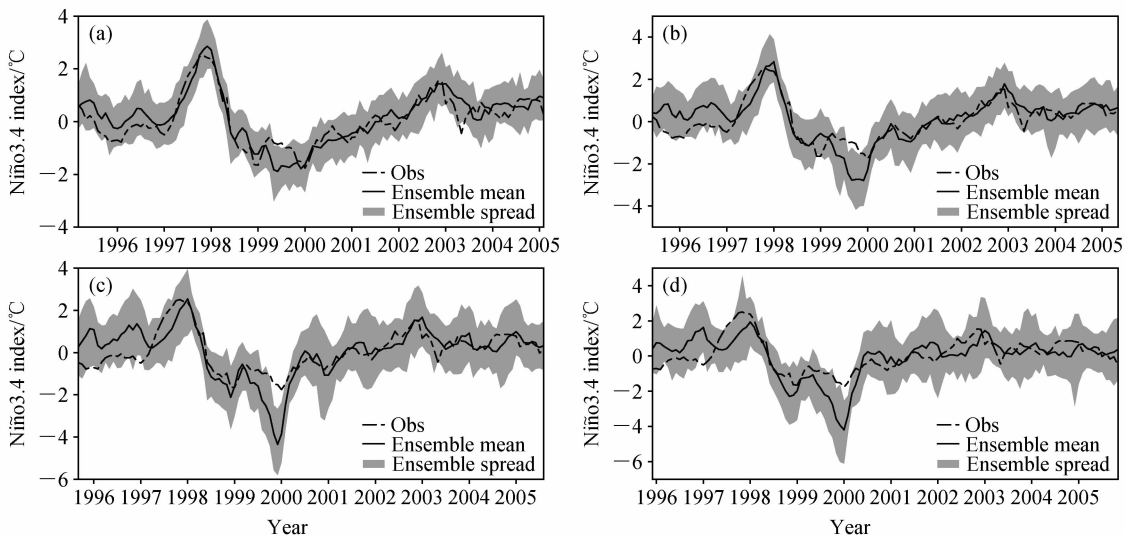


图 15 利用集合方法预报的 Niño 3.4 指数的时间序列图: 预报 (a) 第 3、(b) 第 6、(c) 第 9、(d) 第 12 个月。虚线: 观测; 实线: 样本均值; 阴影: 预报样本的涵盖范围

Fig. 15 Time series of ensemble forecasts of Niño 3.4 SST anomalies for lead times of (a) 3, (b) 6, (c) 9, and (d) 12 months. The shaded area represents the prediction spread of simulated SST anomalies. The results are obtained for all predictions made during the period 1995 – 2004 regardless of their starting months

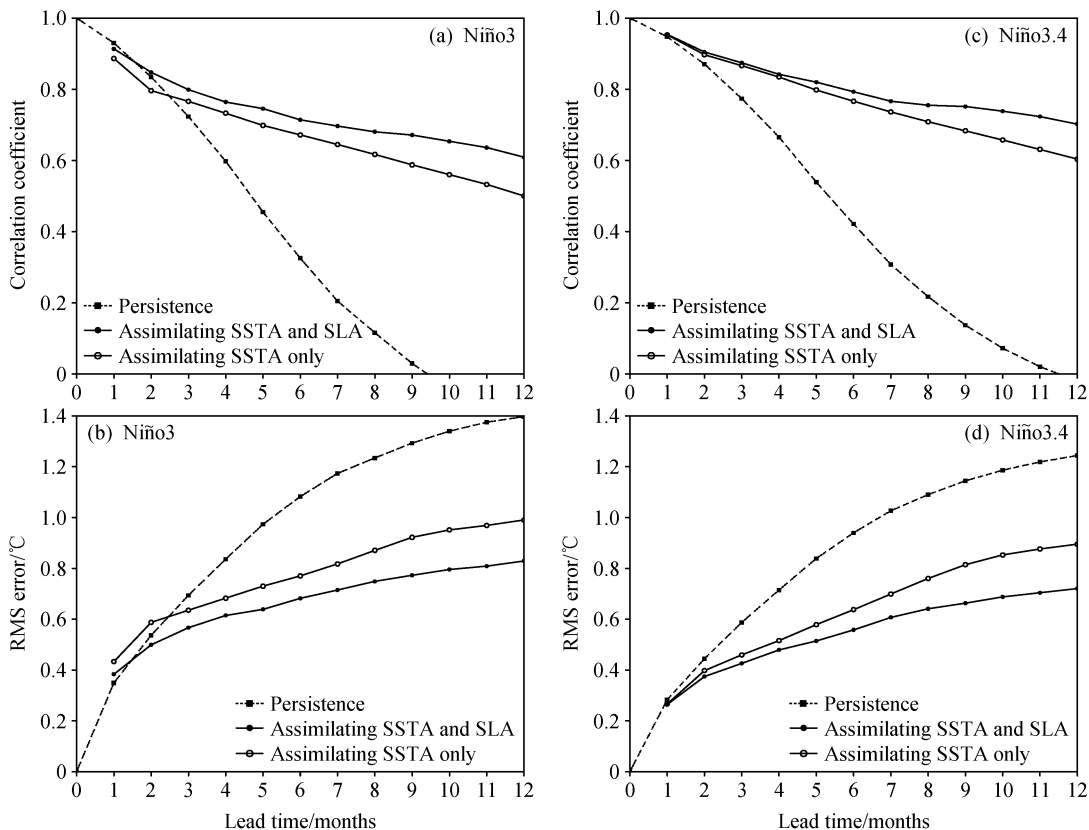


图 16 预报样本均值与观测的 Niño 3 (a、b) 和 Niño 3.4 (c、d) 指数的相关系数 (a、c) 和均方根误差 (b、d) 随预报时间的变化。实心圆: “同化 SSTA 和 SLA” 的预报样本均值; 空心圆: “只同化 SSTA” 的预报样本均值; 虚线: 持续性预报

Fig. 16 Correlations (a, c) and RMS errors (b, d) of SST anomalies between ensemble mean forecasts and observations in the Niño 3 (a, b) and Niño 3.4 (c, d) regions. The lines with solid dots show the results by assimilating both SSTA and SLA (sea level anomalies), the lines with hollow circularities show the results by assimilating SSTA only, and the dashed lines with solid squares show the persistence

区的改善幅度要更大一些^[53]。这些预报性能的改进主要归因于通过“平衡的”多变量模式误差扰动利用集合 Kalman 滤波同化方法将 SLA (sea level anomalies) 资料引入到模式中, 为集合预报提供了更加精确和协调的初始场。同时样本均值可以平滑掉一些不可预报的信息来提高预报技巧。

7 结语

本文就有关 ENSO 机理和预测的研究进行了综合介绍, 其中将有关 SOTA 循环特征的分析结果与过去的研究结果相结合, 提出关于 El Niño (La Niña) 机制的新看法, 即 ENSO 主要是由东亚冬季风异常造成的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。ENSO 循环本质上是次表层海温 (SOTA) 的循环, 即在 El Niño (La Niña) 发生之前, 暖池的次表层都有正 (负) SOTA 存在, 并沿温跃层逐渐从赤道西太平洋向赤道东太平洋传播, 当暖池区的正 (负) SOTA 向东传到赤道东太平洋时, 赤道东太平洋海表水温 (SST) 也将出现正 (负) 异常, 直接导致 El Niño (La Niña) 的爆发; 在正 (负) SOTA 沿赤道东传的同时, 有负 (正) SOTA 沿 10°N 和 10°S 分别向西传播, 在 El Niño (La Niña) 爆发后, 暖池的次表层又都变成为负 (正) SOTA 控制。换句话说, El Niño (La Niña) 或者 ENSO 实际上是热带太平洋次表层海温距平的循环。分析还表明, 次表层海温循环是赤道西太平洋异常纬向风所驱动的, 而赤道西太平洋的异常纬向风主要由东亚冬季风异常所激发。

热带西太平洋大气 ISO 有明显的年际变化, 且与 ENSO 有关, 它作为一种外部强迫, 对 ENSO 循环起着十分重要的作用。强 (弱) 东亚冬季风导致热带太平洋积云对流加强 (减弱), 将引起热带西太平洋大气 ISO 振荡加强 (减弱), 进而可导致赤道西风 (东风) 异常的爆发和东传, 导致 ENSO 的发生。同时, El Niño 的发生同大气 ISO 的明显系统性东传有密切关系。

El Niño 持续时间的长短与也大气环流异常有密切关系, 对于持续时间较长的 El Niño 事件, 东北太平洋上 850 hPa 异常气旋性环流减弱和西北太平洋上异常反气旋性环流增强较慢, 因此赤道太平洋异常西风维持的时间也较长, 而与澳大利亚冬季

风加强相关联的南半球西太平洋的速度势正距平的维持对 El Niño 的持续也起一定作用; 对应持续时间较短的 El Niño 事件, 西太平洋上 200 hPa 速度势正距平的迅速东移, 对其迅速消亡起重要作用。

关于 ENSO 可预报性研究, 与国际上许多研究采用线性奇异向量 (LSV) 法不同, 条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法更利于揭示非线性系统的特征。使用 CNOP 方法揭示了最容易发展成 ENSO 事件的前期征兆 (最优前期征兆): 即赤道东太平洋负 (正) 的海表温度距平和正 (负) 的斜温层深度距平最容易发展成 El Niño (La Niña) 事件。这个理论结果解释了斜温层变化领先于海表温度变化的观测事实, 从物理上进一步阐明了 ENSO 最优前期征兆形成及其发展成 ENSO 事件的机制。使用 CNOP 方法还揭示了 ENSO 事件的“春季可预报性障碍”现象; 对于所用模式, 找出了最容易导致春季可预报性障碍的初始误差模态, 弄清了耦合过程的非线性在 ENSO 春季可预报性障碍研究中的重要作用, 提出了关于春季可预报性障碍的一种可能机制。进一步还研究了 ENSO 可预报性的量化问题, 建立了关于 ENSO 事件第一类可预报性问题的三类子问题, 在一定程度上量化研究了 ENSO 数值模式的可预报性, 较有效地估计模式中 ENSO 事件的最大可预报时间下界、最大预报误差上界和最大允许初始误差下界; 分析了非线性在 ENSO 事件最大预报误差下界估计中的重要作用。

ENSO 预测一直是国内外都十分重视的问题, 大气所也进行了多年的研究试验。本文后一部分是介绍 ENSO 预测系统的研究和试验情况, 包括海洋资料同化系统发展、次表层上卷海温的非局地参数化方法, 以及 ENSO 的跨季度集合预测系统的改进等。

利用大气所的 ENSO 预测系统和海洋资料同化系统 (OVALS), 研究了海洋资料同化在 ENSO 预测中的应用。连续 18 年 (1982~1999 年) 后报试验表明, 三组试验都能较好地预测出这段时期主要的强 El Niño 事件, 尤其是在预测开始的头几个月, 预测技巧可提高 0.1, 并均高于持续性技巧, 但预测的强度还普遍不够。通过参数化次表层上卷海温有效地改进了 ENSO 模拟水平。这种参数化方案通过经验方法将海洋上混合层底部海温变化与海表面起伏联系起来, 从而可以方便地利用模式模拟的海表起伏描述温跃层的变化及对混合层海温变化的影响。

为提高预测水平,我们特别对海洋初始场进行了研究,采用了集合卡曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)同化方法为集合预报系统提供初始的集合样本场;并且提出了一种“平衡的”多变量模式误差扰动方法,使海表温度异常(SSTA)资料和卫星高度计 T/P/J 观测在集合资料同化中能够协调地同化进模式。通过“平衡的”多变量模式误差扰动和利用集合 Kalman 滤波同化方法将 SLA 资料引入到模式中,为集合预报提供了更加精确和协调的初始场。同时,样本均值可以平滑掉一些不可预报的信息来提高 ENSO 预报技巧。

参考文献 (References)

- [1] 陈烈庭. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响. *大气科学*, 1997, **1**: 1~12
- [2] Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 1983, **222**: 1195~1202
- [3] 臧恒范, 王绍武. 赤道东太平洋水温对低纬大气环流的影响. *海洋学报*, 1984, **6**: 16~24
- [4] Wyrski K. El Niño-the dynamic response of equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, **5**: 572~583
- [5] Philander S G, Yamagata T, Pacanowski R C. Unstable air-sea interactions in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 604~613
- [6] Hirst A C. Unstable and damped equatorial modes in simple coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 606~630
- [7] Suarez M J, Schopf P. A delayed action oscillator for ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 3283~3287
- [8] Neelin J D. The slow sea surface temperature mode and the fast-wave limit: Analytic theory for tropical interannual oscillations and experiments in a hybrid coupled model. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**: 584~606
- [9] Mantua N J, Battisti D S. A periodic variability in the Zebiak-Cane coupled ocean-atmosphere model: Air-sea interaction in the equatorial Pacific. *J. Climate*, 1995, **8**: 2897~2927
- [10] Goddard L, Graham N E. El Niño in the 1990s. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 10423~10436
- [11] McPhaden M J. The child prodigy of 1997-1998. *Nature*, 1999, **398**: 559~562
- [12] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *J Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 811~829
- [13] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**: 163~172
- [14] 李崇银. 频繁强东亚大槽活动与 El Niño 的发生. *中国科学(B)*, 1988, **18**: 667~674
- [15] Li Chongyin. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events. *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**: 36~46
- [16] Li Chongyin, Mu Mingquan. ENSO cycle and anomalies of winter monsoon in East Asia. *East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate*, C. P. Chang, J. C. L. Chan and J. T Wang, Eds. World Scientific, 1998. 60~73
- [17] 李崇银, 穆明权. 异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究. *大气科学*, 1998, **22**: 481~490
- [18] 李崇银, 穆明权. ENSO 发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常. *大气科学*, 1999, **23**: 513~521
- [19] 巢纪平, 袁绍宇, 巢清尘, 等. 热带西太平洋暖池次表层暖水的起源——对 1997/1998 年 ENSO 事件的分析. *大气科学*, 2003, **27**: 145~151
- [20] 周广庆, 李崇银. 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 关系的 GCM 模拟结果. *气候与环境研究*, 1999, **4**: 346~352
- [21] Mu Mu, Duan Wansuo, Wang Bin. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, **10**: 493~501
- [22] Duan Wansuo, Mu Mu, Wang Bin. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for El Niño-Southern Oscillation events. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D23105, doi:10.1029/2004JD004756
- [23] Mu Mu, Duan Wansuo. A new approach to studying ENSO predictability: Conditional nonlinear optimal perturbation. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, **48**: 1045~1047
- [24] Mu Mu, Duan Wansuo, Wang Bin. Season-dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and ENSO predictability in a theoretical model. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D10113, doi:10.1029/2005JD006981
- [25] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 877~926
- [26] Duan Wansuo, Mu Mu. Applications of nonlinear optimization method to the numerical studies of atmospheric and oceanic sciences. *Appl. Math. Mech.*, 2005, **26**: 636~646
- [27] Li Chongyin. Westerly anomalies over the equatorial western Pacific and Asian winter monsoon. *Proceeding of International Scientific Conference on the TOGA Programme, WCRP-91-WMO/TP*, No. 717, 1995, 557~561
- [28] 李崇银, 穆明权. 东亚冬季风-暖池状况-ENSO 循环的关系. *科学通报*, 2000, **45**: 678~685
- [29] 李崇银, 李桂龙. 同 El Niño 发生相联系的热带大气动能的变化. *科学通报*, 1995, **40**: 1866~1869
- [30] Li Chongyin, Liao Qinghai. The exciting mechanism of tropical intraseasonal oscillation to El Niño event. *J. Tropical Meteor.*, 1998, **4**: 113~121
- [31] 李崇银, 周亚萍. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关

- 系. 地球物理学报, 1994, **37**: 17~26
- [32] Li C Y, Mu M Q. A further study of the essence of ENSO. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2002, **26**: 309~328
- [33] Mu Mu, Xu Hui, Duan Wansuo. A kind of initial errors related to “spring predictability barrier” for El Niño event in Zebiak-Cane model. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L03709, doi:10.1029/2006GL027412
- [34] Chen D, Zebiak S E, Busalacchi A J, et al. An improved procedure for El Niño forecasting. *Science*, 1995, **269**: 1699~1702
- [35] Chen D, Cane M A, Kaplan A, et al. Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*, 2004, **428**: 733~736
- [36] Duan Wansuo, Xu Hui, Mu Mu. The decisive role of nonlinear temperature advection in El Niño and La Niña amplitude asymmetry. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**, C01014, doi: 10.1029/2006JC003974
- [37] Zhou G Q, Zeng Q C. Predictions of ENSO with a coupled GCM. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 587~603
- [38] 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. 气候与环境研究, 1998, **3**: 349~357
- [39] 周广庆, 李旭. 一个基于大洋环流模式的全球海洋资料同化系统. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 393~400
- [40] Zhu Jiang, Yan Changxiang. Nonlinear balance constraints in 3DVAR. *Science in China (D)*, 2006, **49**: 331~336
- [41] Yan Changxiang, Zhu Jiang, Li Rongfeng, et al. Roles of vertical correlation of the background covariance and T-S relation in estimation temperature and salinity profiles from surface dynamic height. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: C08010, doi:10.1029/2003JC002224
- [42] Zhu Jiang, Zhou Guangqing, Yan Changxiang, et al. A three-dimensional variational ocean data assimilation system: Scheme and preliminary results. *Science in China (D)*, 2006, **49** (12): 1212~1222
- [43] Latif M, Sperber K, Arblaster J, et al. ENSIP: the El Niño simulation intercomparison project. *Climate Dyn.*, 2001, **18**: 255~276
- [44] AchutaRao K, Sperber K R. Simulation of the El Niño Southern Oscillation: Results from the coupled model intercomparison project. *Climate Dyn.*, 2002, **19**: 191~209
- [45] Davey M K, et al. STOIC: a study of coupled model climatology and variability in tropical ocean regions. *Climate Dyn.*, 2002, **18**: 403~420
- [46] Syu H H, Neelin J D. ENSO in an hybrid coupled model. Part I: Sensitivity to physical parameterization. *Climate Dyn.*, 2000, **16**: 19~35
- [47] Meehl G A, Gent P R, Arblaster J M, et al. Factors that affect the amplitude of El Niño in global coupled climate models. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 515~526
- [48] Zhang R H, Zebiak S E. An embedding method for improving interannual variability simulation in a hybrid coupled model of the tropical Pacific ocean – atmosphere system. *J. Climate*, 2004, **17**: 2794~2812
- [49] Zhang R H, Kleeman R, Zebiak S E, et al. An empirical parameterization of subsurface entrainment temperature for improved SST anomaly simulation in an intermediate ocean model. *J. Climate*, 2005, **18**: 350~371
- [50] 朱杰顺, 周广庆, Zhang Rong-Hua, 等. 参数化次表层上卷海温改进 ENSO 模拟. 大气科学, 2006, **30** (5): 939~951
- [51] Zheng F, Zhu J, Zhang R-H, et al. Ensemble hindcasts of SST anomalies in the tropical Pacific using an intermediate coupled model. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L19604, doi:10.1029/2006GL026994
- [52] 郑飞, 朱江, 王慧. ENSO 集合预报系统的检验评价. 气候与环境研究, 2007, **12** (5): 587~594
- [53] Zheng F, Zhu J, Zhang R. The impact of altimetry data on ENSO ensemble initializations and predictions. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: 13611, doi:10.1029/2007GL030451