

# IOCAS ICM 及其 ENSO 实时预测试验和改进\*

高川<sup>1,2</sup> 王宏娜<sup>1,2</sup> 陶灵江<sup>1,3</sup> 张荣华<sup>1,2,3</sup>①

(1. 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 青岛 266237;  
3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)是仅次于季节变化的最强年际气候变率信号,对全球气候和天气产生重要影响。准确、及时、有效地预报 ENSO 事件的发生和演变具有重大的实用意义。以中国科学院海洋研究所冠名的中等复杂程度海气耦合模式(IOCAS ICM),每月定期进行 ENSO 实时预报试验。IOCAS ICM 实时预报结果目前收录于美国哥伦比亚大学国际气候研究所(IRI),以作进一步的集成分析和应用。该模式的大气部分是一个描述对海表温度(SST)年际异常响应的风应力异常经验模式,海洋部分包括了动力海洋模块、SST 距平模块(嵌套于动力海洋模块中)和次表层上卷海温( $T_e$ )距平模块三部分。IOCAS ICM 的特点之一是开发了次表层海温反算优化这一创新技术,可有效改进热带太平洋 SST 异常的模拟和预报。IOCAS ICM 和其他海气耦合模式的最新预报结果(以 2017 年 9 月为初条件)表明,2017 年年末热带太平洋会处于一个 SST 冷异常态,最大变冷中心集中在赤道东太平洋,但并不足以达到拉尼娜(La Niña)事件的水平,SST 冷异常可能会在 2018 年春季逐渐减弱,转化为中性状态。此外,本文还对四维变分资料同化方法(4D-Var)以及条件非线性最优扰动方法(CNOP)在 IOCAS ICM 中的应用进行了讨论。

**关键词** IOCAS ICM; ENSO 实时预报试验; 资料同化; CNOP 技术

**中图分类号** P732 **doi:** 10.11693/hyhz20170500132

厄尔尼诺和南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)起源于热带太平洋海表风场-海表温度场-海洋温跃层间的相互作用(Bjerknes, 1969),具有 2—7 年的显著周期振荡,是地球气候系统中最强的年际尺度变化信号(巢纪平等, 2003; 李崇银等, 2008)。ENSO 虽然是发生在热带太平洋地区年际时间尺度上的海气耦合现象,但通过大气遥相关过程可对全球天气及气候产生重大影响(丁一汇等, 2008)。如 1997—1998 年爆发的强 El Niño 事件,所造成的全球经济损失高达 300 亿美元,包括引发了 1998 年夏季我国东北地区以及长江流域的特大暴雨洪涝灾害(黄荣辉等, 1998)。又如 2015 年热带太平洋刚刚经历过的强 El Niño 事件,其持续之久、强度之大造成全球气候异常及极端天气发生(刘屹岷等, 2016)。因此,

准确、及时、有效地预报 ENSO 事件的发生、发展和演变对于短期气候预报和防灾减灾等具有重大的应用意义。

近几十年来对 ENSO 的模拟和预报研究已取得了巨大进展,各类模式的快速发展使得 ENSO 实时预报成为可能[图 1; 详情请参见美国哥伦比亚大学(Columbia University)国际气候研究所 International Research Institute for Climate and Society (IRI)关于 ENSO 实时预报集成分析的网站: <http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/update.html>]。特别是各类复杂程度不同的海气耦合模式的发展,包括中间型耦合模式(ICMs; Zhang *et al*, 2013)、混合型耦合模式(HCMs; Zhang *et al*, 2015)以及海洋-大气完全耦合的环流模式(CGCMs; Philander *et al*, 1992),使得能够

\* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)项目, XDA11010105 号, XDA11020306 号; 国家自然科学基金项目, 41705082 号, 41690122 号, 41690120 号, 41475101 号。高川, 博士, E-mail: gaochuan@qdio.ac.cn

通讯作者: 张荣华, 研究员, E-mail: rzhang@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-05-16, 收修改稿日期: 2017-09-22

较为准确地提前 6 个月到 1 年对 ENSO 进行预报。国内多家单位也逐步开展对 ENSO 的实时预测(Zhang *et al.*, 2013; 任宏利等, 2016; 郑飞等, 2016)。ENSO 预测成为目前国际上短期气候预测领域最为成功的范例(Chen *et al.*, 1995, 2004; 巢纪平等, 2003; Zhang *et al.*, 2013)。

尽管如此, 由于 ENSO 时空演变的可变性和多样性极强, 数值模式对 ENSO 的预报存在很大的不确定

性(Mu *et al.*, 2002), 仍不能对其演变的全过程进行准确、有效的实时预报。特别是针对 2014—2016 年间的 El Niño 现象预报表明, 模式对 ENSO 实时预报存在误差: 如 2014 年并未像许多耦合模式所预报的那样发生强 El Niño 事件, 而对 2015 年强 El Niño 事件的预报仍然不够准确(图 1)。这对 ENSO 实时预报提出了严峻挑战, 在国际上激发了新一轮的 ENSO 研究热潮。

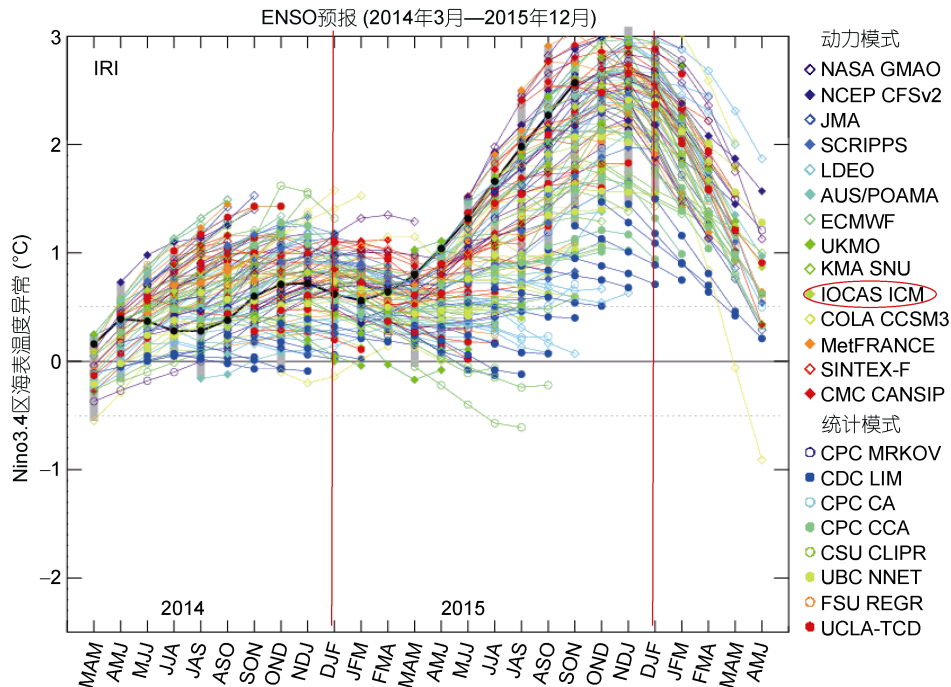


图 1 观测(黑线)和不同的模式(彩线; 包括 IOCAS ICM)预报得到的 2014—2015 年间 Niño3.4 区海表温度异常的时间序列  
Fig.1 The Niño 3.4 sea surface temperature (SST) anomalies in 2014—2015, observed (black line) and predicted (colored lines) by different dynamical and statistical models, including the IOCAS ICM

注: 每条彩线代表不同模式从不同的初始条件预报 5 个月的 3 个月滑动平均的结果(如 MAM 表示 3 月-4 月-5 月)轨迹, 此图直接取自 IRI 网站(<http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/2015-Dec-quick-look>)

目前以中国科学院海洋研究所(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, IOCAS)冠名的一个中等复杂程度的海气耦合模式(IOCAS ICM)每月定期进行 ENSO 实时预报试验, 其结果收录于美国哥伦比亚大学国际气候研究所(IRI), 以对 ENSO 的预报作进一步集成分析和应用(图 1; 详情请见 <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current>), 这是首个以我国机构命名的为国际学术界提供 ENSO 实时预报结果分析的海气耦合模式。IOCAS ICM 的特点之一是次表层上卷到混合层海水温度( $T_e$ )的参数化方式(Zhang *et al.*, 2003), 其开发的次表层海温反算优化创新技术, 可有效改进对热带太平洋 SST 的模拟和预报。IOCAS ICM 已成功用于

对 ENSO 事件模拟和预报研究, 如对 2010—2012 年热带太平洋二次变冷事件的准确预报(Zhang *et al.*, 2013), 并对预报准确的原因进行分析, 表明大气风场强迫和次表层热力效应的强度对 ENSO 预报起到同等重要的作用(Gao *et al.*, 2017a)。又如揭示了  $T_e$  在 ENSO 循环中的重要作用, 提出了 ENSO 事件起源的一个新机制(Zhang *et al.*, 2016a)。同样, 对 2014—2016 年的 El Niño 事件进行了预报(Zhang *et al.*, 2016b), 并对其间的二次变暖过程和机制进行了分析(Zhang *et al.*, 2017a)。结果表明, IOCAS ICM 很好地预报出 2014—2016 年间赤道太平洋 SST 变暖和变冷的趋势, 对 SST 振幅的预报趋近于所有动力模式的平均值。

本文将对 IOCAS ICM 进行较为详细的介绍, 并

给出 IOCAS ICM 和其他模式对 2017—2018 年赤道太平洋海表温度变化的实时预报结果, 此外还将对 IOCAS ICM 的改进和应用进行简单介绍, 包括四维变分(4D-Var)资料同化方法和条件非线性最优扰动方法(CNOP)在 IOCAS ICM 中的应用等。

## 1 IOCAS ICM 介绍

IOCAS ICM 是一个中等复杂程度的海气耦合模式, 该模式的大气部分是一个描述对 SST 年际异常响应的风应力异常经验模式, 海洋部分包括了动力海洋模块、SST 距平模块(嵌套于动力海洋模块中)和次表层上卷海温( $T_e$ )距平模块三部分(图 2)。IOCAS ICM 的特点之一是开发了次表层海温反算优化创新技术, 即在海洋模块计算 SST 异常时采用  $T_e$  的优化方案, 这可有效改进对热带太平洋 SST 的模拟和预报。该模式具有优良的性能, 已用于 ENSO 实时预报试验, 其实时预报结果以中科院海洋所冠名(IOCAS ICM), 收录于美国哥伦比亚大学国际气候研究所(IRI)以作进一步的集成分析和应用。

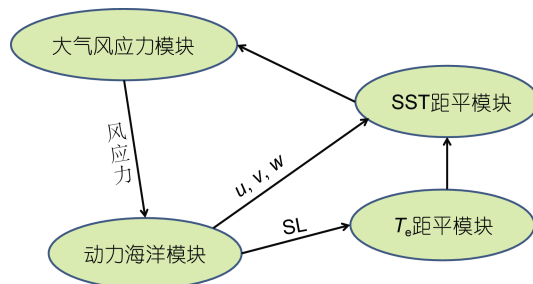


图 2 IOCAS ICM 构成框架示意图

Fig. 2 The schematic diagram illustrating the IOCAS ICM  
注: 包括一个动力海洋模式、一个海表温度(SST)距平模式、一个从海表高度(SL)计算  $T_e$  异常的经验模式和一个计算风应力的统计模式, 其中  $u, v, w$  分别为纬向、经向和垂向流速

### 1.1 动力海洋模块

IOCAS ICM 是一个距平模式, 其动力海洋模块是在垂直方向斜压模分解方法(McCreary, 1981)基础上发展的一个中等复杂程度的海洋模式(Keenlyside *et al.*, 2002), 其动力过程分为线性部分和非线性部分。线性部分是模态分解方法的扩展, 考虑了海洋层结的水平变化及动量方程的部分非线性作用。通过垂直方向模态分解的方法进行求解, 保留了前 10 个斜压模态, 并且在表面两层中包含了第 11-30 个高阶斜压模态的联合影响。线性部分动量方程的非线性部分作为动力方程的剩余项而高度简化, 只包含在表面

两层, 线性解通过非线性平流项来驱动动量方程而得到非线性解, 这样对由于线性假设不适用于赤道区域求解而进行了一个修正。线性和非线性部分共同组动力海洋模块, 可求解动力海洋变量, 包括混合层内水平流速、混合层底垂向速度及海洋压力场等的模拟。

IOCAS ICM 的动力海洋模式包括热带太平洋和大西洋海盆区域( $31^{\circ}\text{S}$ — $31^{\circ}\text{N}$ ,  $124^{\circ}$ — $30^{\circ}\text{E}$ ), 具有真实的海陆分布。模式的经向分辨率由南北纬  $10^{\circ}$  内的  $0.5^{\circ}$  逐渐向南北边界延伸至  $3^{\circ}$ , 纬向分辨率为  $2^{\circ}$ , 垂向假定有 5500m 深的平底海洋。垂向的线性部分在 Levitus(1982)定义的标准海洋等深面上有 33 层, 其中上层 125m 占 8 层。非线性和高阶斜压模的影响只考虑了两层, 厚度为 125m, 由混合层分隔(深度随空间位置而变, 由 Levitus 年平价的温、盐数据根据稳定性判断计算而得)。

### 1.2 SST 距平模块及 $T_e$ 的经验参数化方法

在 IOCAS ICM 中, SST 距平模式嵌入到动力海洋模块中, 表征表层混合层的热力动力学过程。决定海表混合层温度异常( $T'$ )年际变化的控制方程可写为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} = & -u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - (\bar{u} + u') \frac{\partial T'}{\partial x} - v' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - (\bar{v} + v') \frac{\partial T'}{\partial y} \\ & - \{(\bar{w} + w')M(-\bar{w} - w') - \bar{w}M(-\bar{w})\} \frac{(\bar{T}_e - \bar{T})}{H} \\ & - (\bar{w} + w')M(-\bar{w} - w') \frac{(T'_e - T')}{H} - \alpha T' \\ & + \frac{\kappa_h}{H} \nabla_h \cdot (H \nabla_h T') + \frac{2\kappa_v}{H(H+H_2)} (T'_e - T') \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $u, v, w$  分别为纬向、经向和垂向流速,  $T_e$  为海洋次表层上卷温度场,  $H$  为海表混合层深度( $H_2$  为次表层厚度, 取  $H+H_2=125\text{m}$ ); 带上划线“ $\bar{\cdot}$ ”项为气候平均场, 带“ $'$ ”项为年际异常场;  $M(\delta)$  为 Heaviside 阶梯函数[当  $\delta \geq 0$  时,  $M(\delta)=\delta$ ; 当  $\delta < 0$  时,  $M(\delta)=0$ , 引入这一函数表征只有当次表层海水卷入海洋混合层时, 才对 SST 产生影响];  $\kappa_v$  和  $\kappa_h$  分别为垂直扩散系数和水平扩散系数,  $\alpha$  为热耗散系数[表层热通量的参数化, 与局地 SST 异常成负比例关系, 取  $\alpha=(100 \text{天})^{-1}$ ]。方程左边为海表温度倾向项, 方程右边为各种贡献项(水平平流项、水平扩散项、垂直平流项、垂直扩散项和热耗散项等)。对海表温度年际异常诊断分析表明, 其中与  $T'_e$  相关联的项是方程右边项中的大项(即垂直扩散项和垂直平流项)。由于次表层温度场不能

直接由动力海洋模式获得,因此,  $T_c$  必须根据其他海洋动力变量进行参数化以用于 SST 异常模式。

鉴于热带海洋中温跃层的变化是通过挟卷过程及垂直扩散过程而成为影响 SST 变化的最大项, Zhang 等(2003)发展了一个经验方法用于 ICM 中  $T_c'$  的参数化, 以在给定的 SST 距平方程中优化 SST 的模拟。 $T_c'$  优化算法分为两步进行, 第一步是反算法: 从观测的 SST 场计算出 SST 倾向场[即方程(1)左边]; 从观测和模式模拟确定出方程(1)右边除  $T_c'$  外的其它各项, 于是便可以从方程(1)右边反算出  $T_c'$  场[若将这一方法得到的  $T_c'$  场再代入原方程的右边去计算 SST 倾向场(方程左边), 那么就得到与观测几乎完全一样的 SST 倾向场。从数值模拟角度来说, 这是有可能得到的最完美的结果了! ]。第二步: 用奇异值分解(SVD)或经验正交函数分解(EOF)等常用统计方法, 建立一个上述计算得到的  $T_c'$  场与海洋动力变量(如海表高度 SL)间的统计关系。从而通过 SL 场可直接估算出  $T_c'$  场, 继而可计算 SST 倾向和 SST 场, 最终将有效地改进 SST 的模拟和预报。这一创新性的方法已成功用于 ICM 和 HCM 中(Zhang *et al*, 2003, 2005b, 2006; Zhu *et al*, 2013)。

$T_c'$  参数化方案的具体构建过程如下: 首先, 观测的风场驱动海洋动力模式从 1960 年积分到 1998 年, 得到包括 SL 场在内的各海洋要素场(气候平均场和年际异常场等); 然后, 从观测资料可以得到 SST 倾向场[方程(1)左边]和其气候态场( $\bar{T}$ )等, 于是根据方程(1)就可以反算得到 1960 至 1998 年间的  $T_c'$  场; 最后, 因在热带太平洋中, 次表层温度扰动主要是温跃层变动所致(即  $T_c'$  与 SL 间关系极好!), 因此用 EOF 方法从 1960—1998 年历史资料中构建出  $T_c'$  和 SL 间的经验关系[可表示为  $T_c' = \alpha_{Tc} \cdot F_{Tc}(SL_{inter})$ , 其中  $\alpha_{Tc}$  是表征次表层热力强迫大小的可调系数], 这里选取了 EOF 的前五个模态。当然也可用其它不同历史时期构建  $T_c'$ - $SL_{inter}$  之间的关系, 用于研究它们对 ENSO 的影响等(Zhang *et al*, 2005a)。

### 1.3 表征年际风应力异常的统计大气模块

IOCAS ICM 模式中的大气风应力模块同样采用一个经验统计模型, 考虑了风应力  $\tau$  对 SST 异常的经验反馈响应[可表示为:  $\tau = \alpha_\tau \cdot F_\tau(SST_{inter})$ , 其中  $\alpha_\tau$  表示风场动力强迫大小的一种度量]。同样, 这一响应关系用观测的月平均 SST 和风应力的时间序列计算的 SVD 协方差矩阵进行构造, 这里采用 SST 异常和经向、纬向风应力异常间协方差的联合 SVD 分析(Zhang

*et al*, 2003)。根据这种经验统计模型得到的统计风应力模式依赖风场的季节变化。应用 SVD 方法, 将模拟出的 SST 异常投影到构造的  $\tau$ - $SST_{inter}$  模态中的 SST 部分, 然后估计出相关的风应力异常以驱动海洋模式。

### 1.4 耦合过程

图 2 表示模式异常变量间交换的耦合系统。在每一个时间积分步(4800s/步), 首先由 SST 方程模拟得到 SST 异常场, 应用大气风应力模式, 根据所得 SST 异常来确定风应力异常; 其次用所得到的风应力场驱动动力海洋模式, 得到 SL 异常、相关的混合层流场和混合层底异常的垂向流速; 然后应用  $T_c$  模式, 用模拟得到的 SL 异常估算出  $T_c$  异常场; 最后, 根据方程(1)计算 SST 异常。重复上述过程即可模拟出大气风场和海洋场的年际变化等。耦合系统中大气  $\tau$  和海洋 SST 间的信号每天交换一次; 同样, 用于 SST 距平模式的  $T_c$  异常场每天由 SL 异常更新一次。注意, 模式的每个时间积分步中, 年际 SST 异常直接由 SST 距平模式产生。ICM 的初始化在强加的 8 个月西风异常驱动下产生, 其后模式中异常条件的发展仅由系统中耦合的海气相互作用决定。

在这个耦合系统中, 两个显著的强迫场(海洋模式中的  $\tau$  及 SST 距平模式中的  $T_c$ )都是由 SVD 或 EOF 方法确定的, 计算所得到的  $T_c$  和  $\tau$  的振幅可进一步由耦合系数( $\alpha_\tau$  和  $\alpha_{Tc}$ )重新调整。先前的数值模式研究表明, 耦合系统对耦合系数的大小十分敏感, 即可引入一个可调的常参数以合理表征大气模式中的风应力异常的强度( $\alpha_\tau$ ); 同样基于统计方法的  $T_c$  距平模式中的  $T_c$  异常可以乘上一个常参数( $\alpha_{Tc}$ )。基于 ICM 采用不同参数值的敏感性试验表明, 当  $\alpha_\tau=1.0$  和  $\alpha_{Tc}=1.0$  时, 模式产生的耦合振荡非常强; 当  $\alpha_\tau=0.87$  和  $\alpha_{Tc}=1.0$  时, 模式可产生合理的准 4 年周期振荡的年际变化; 当  $\alpha_\tau$  和  $\alpha_{Tc}$  减小时, 模式产生的振荡衰减, 但振荡周期几乎没有改变。

### 1.5 实时预报过程

IOCAS ICM 可真实地再现 SST 年际变化的空间结构和时间演变, 这为热带太平洋 SST 的实时预报提供了基础。目前利用 IOCAS ICM 进行实时预报的过程如图 3 所示(Zhang *et al*, 2016b)。采用简单的初始化方法: 仅利用观测到的 SST 异常进行预报初始化(Zhang *et al*, 2013)。在进行实时预报试验时, 通常在每个月的月中进行, 这时上个月月平均的 SST 场和当前月第一周周平均的 SST 场可由美国国家海洋

和大气管理局环境模拟中心(NOAA/EMC)得到(Reynolds *et al.*, 2002)。以 2015 年 1 月 1 日的预报为例, 首先, 采用线性插值的方法将观测的 1982 年 1 月到 2014 年 12 月的月平均 SST 的历史数据以及 2015 年 1 月第 1 周的 SST 数据进行插值, 形成一个与模式网格点一致的连续的每日 SST 场; 然后, 年际的风应力异常场作为对观测的 SST 异常的响应由经验模式算出; 其次, 获得的年际风应力异常场更新至 2015 年 1 月, 用来驱动海洋模式产生每个月第一天的初始海洋状态(如 2015 年 1 月 1 日); 最后, 利用 2015 年 1 月 1 日的初始条件基于 IOCAS ICM 进行预报。注意, IOCAS ICM 是一个直接产生年际 SST 异常的距平模式, 对 ICM 产生的异常场无任何修正和调整。自从 2003 年起, 此 ICM 用于对热带太平洋 SST 状态进行提前 12 个月预报, 实时预报结果定期发布在 IRI 网站上。

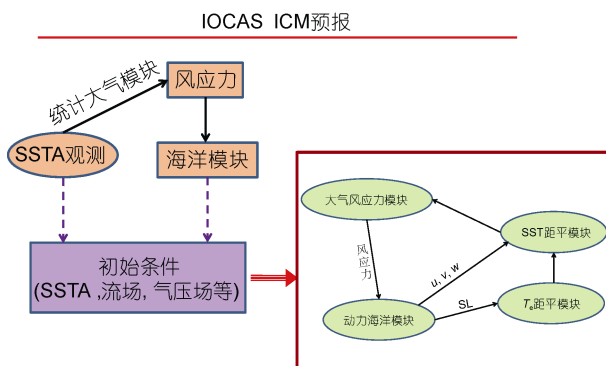


图 3 IOCAS ICM 实时预报示意图

Fig.3 The schematic diagram showing the real-time prediction system

注: 分为两个部分: 左侧(方框外)表示一个简单的初始化过程, 右侧(方框内)是 IOCAS ICM 的组成部分。当进行实时预报时, 观测到的年际海表温度异常是唯一用来初始化模式的变量场: 首先, 观测到的海表温度异常根据经验的风应力异常模式计算出年际风应力场; 其次, 获得的风应力场用来强迫单独的海洋模式获得海洋状态(海表温度、海流场、海洋压力场的异常等); 最后, 由单独强迫海洋模式(左侧)模拟得到的海洋状态用作初始场进行 IOCAS ICM(右侧)实时预报

### 1.6 观测和模拟所需数据与分析过程

观测和模拟得到的不同资料用来构造  $\tau$  和  $T_e$  两个经验模式以及对模式的模拟效果进行验证。观测的 SST 资料来自 Reynolds 等(1994); 月平均的风应力数据来自美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)联合推出的再分析资料; 此外, 热带太平洋海气状态的实时演变可以直接在热带大气海洋计划(TAO)实时数据观测网站上在线获得(<http://www.pmel.noaa.gov/tao/>)。用于构造基于 SVD

的  $\tau$  模式的风应力异常资料是 ECHAM4.5 AMIP 运行的 24 组集合平均的结果, 每一组都由 1950—1999 年观测的 SST 异常资料强迫获得。采用集合平均的资料是为了强化大气对外部 SST 异常的响应信号, 减弱大气噪声对热带耦合系统的影响。SL 异常和海流异常历史资料由 NCEP/NCAR 再分析的年际风应力异常驱动单独的海洋模式模拟产生(1962—1999 年); 气候态平均的海流场同样由 NCEP/NCAR 再分析的气候平均风应力驱动单独的海洋模式模拟所得。年际的  $T_e$  异常场由 SST 距平方程反算出来: 首先, 用 NCEP/NCAR 再分析的气候态风应力驱动动力海洋模式来获得平均流场; 然后, 用 NCEP/NCAR 再分析的异常风应力驱动海洋模式, 以获得海洋流场和压力场等的年际异常; 最后用 Reynold 等(1994)的观测的 SST 场和 SST 倾向场、及模拟的平均流和异常流, 通过 SST 距平方程反算估计出  $T_e$  异常场。

这些观测和模式模拟得到的异常场用于构建  $T_e$  和  $\tau$  两个经验模式(1963—1996 年间的 34 年数据)。大气和海洋的季节变化对 El Niño 事件起源发展的影响非常重要, 因此, 构造的  $T_e$  和  $\tau$  模式是依赖季节变化的, 分别对每个月(总共 34 个样本)的资料进行 EOF 或 SVD 分解, 从而两个模式都分别包括了 12 个不同的子模式, 每个月对应一个模式。此外, 模式的效果还依靠其他因素, 如保留的 EOF(SVD)模态的截断模数等。鉴于对 EOF(SVD)主成分的考虑和重构振幅的合理性的试验, 最终保留前 5 个 EOF(SVD)模态(Zhang *et al.*, 2005)。

## 2 对于 2017—2018 年赤道太平洋海表温度的预报试验

2015 年年末, 热带太平洋经历了一次强 El Niño 事件, 随后 2016 年年末赤道太平洋转为冷异常态。于是, 关于 2017 年赤道太平洋海表温度的变化早就受到了学者和公众的关注。ENSO 现象具有多样性和多变性, 其发展演变过程非常复杂, 加之春季预报障碍现象的存在, 因此, 对 ENSO 预报准确性的挑战更为严峻。目前 IOCAS ICM 和其他海气耦合模式的最新预报结果(以 2017 年 9 月为初条件)表明, 2017 年年末热带太平洋会处于一个 SST 冷异常态, 但并不足以达到拉尼娜(La Niña)事件水平, SST 冷异常可能会在 2018 年春季逐渐减弱, 转化为中性状态。

### 2.1 各模式预报结果

美国哥伦比亚大学国际气候研究所(IRI)集成

了多个模式对于 ENSO 实时预报的结果, 定期给出 ENSO 实时预报并进行集成分析, 其中包括 18 个动力模式和 6 个统计模式。IOCAS ICM 的预报结果亦在其中。图 4 给出了不同模式从 2017 年 9 月预报得到的 2017—2018 年 Niño3.4 区 SST 异常的时间序列, 由图可见, 各个模式对 ENSO 预报存在很大

的差异, 其振幅相差很大, 随着预报时效的延长, 模式间的差异逐步加大。大部分模式的预报结果表明 2017 年年末热带太平洋会处于一个 SST 冷异常态, 但是不同模式对变冷强度的预报存在很大的差异, 对这次事件的强度预报还存在很大的不确定性。

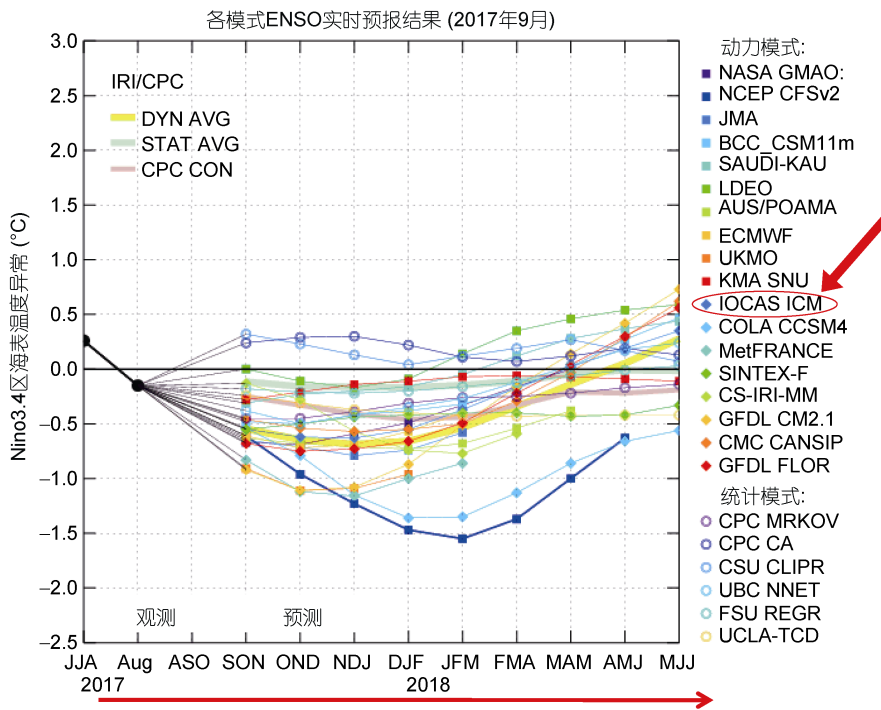


图 4 不同模式(彩线; 包括 IOCAS ICM)从 2017 年 9 月预报得到的 2017—2018 年 Niño3.4 区海表温度异常的时间序列  
 Fig.4 The Niño 3.4 sea surface temperature (SST) anomalies in 2017—2018 predicted (colored lines) in mid-Sep 2017 using different models, including the IOCAS ICM

注: 每条彩线表示预报 9 个月的 3 个月滑动平均的结果(如 ASO 表示 8 月-9 月-10 月), 此图直接取自 IRI 网站(<http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/ens0/2017-Sep-quick-look>)

从图 1 有关历史实时预报结果可以看出, 耦合动力模式的预报效果要优于统计模式。为了便于定量比较预报结果, 表 1 给出了不同耦合模式从 2017 年 9 月起预报得到的 2017—2018 年 Niño3.4 区三个月滑动平均的 SST 异常值, 其中包括 IOCAS ICM。大多数动力模式在一定程度上都利用了观测资料来进行预报初始化, 即便如此, 预报时效却存在明显差异, 并且各个模式预报的 SST 异常在几个月后就相差很大了。所有的动力模式的预报均显示 2017 年年末热带太平洋会处于一个 SST 冷异常态, 但是变冷的强度存在一定差异。从动力模式预报结果的平均值来看, 2017 年年末将有可能发生一次 La Niña 事件, 但强度很弱。

### 2.2 IOCAS ICM 预报结果

IOCAS ICM 的实时预报结果在图 1、图 4 及表 1

中清晰可见。从历史的实时预报试验来看, IOCAS ICM 合理地抓住了 2015—2016 年 El Niño 事件变冷和变暖的趋势。例如, IOCAS ICM 并没有像其他模式一样, 将 2014 年预报成一个强 El Niño 事件; 并且很好地刻画出从 2015 年夏季开始并在 2015 年夏季期间进一步增强的赤道东太平洋区域 SST 的变暖; 此外, 还成功预报出赤道太平洋 SST 于 2016 年转为冷异常的过程。同样, IOCAS ICM 和其他预报模式一样, 也存在一定的不确定性, 例如预报强度等存在偏差。从未来的实时预报角度来看, IOCAS ICM 对 2017 年年末赤道太平洋海表温度预报为冷异常态, 并且变冷的强度趋于各个模式预报的平均值。

为了更详细地说明 IOCAS ICM 对 2017—2018 年赤道太平洋海表温度时空发展演变的预报结果,

表 1 不同动力耦合模式(包括 IOCAS ICM)预报得到的 2017—2018 年 Niño3.4 区海表温度异常值(单位: °C)  
Tab.1 The Niño 3.4 sea surface temperature (SST) anomalies in 2017—2018 predicted using different dynamical coupled models, including the IOCAS ICM

模式	季节(2017—2018)									
	9—11 月	10—12 月	11—1 月	12—2 月	1—3 月	2—4 月	3—5 月	4—6 月	5—7 月	
动力模式										
NASA GMAO model	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0			
NCEP CFS version 2	-0.6	-1.0	-1.2	-1.5	-1.6	-1.4	-1.0	-0.6		
Japan Met. Agency model	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.6					
Beijing Climate Center BCC-CSM1.1M	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	0	0.3	0.5	
King Abdulaziz University	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	
Lamont-Doherty model	0	-0.1	-0.2	-0.1	0.1	0.4	0.5	0.5	0.6	
POAMA (Austr) model	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.5	-0.4			
ECMWF model	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4					
UKMO model	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0						
KMA (Korea) SNU model	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
IOCAS (China) Intermed. Coupled model	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	
COLA CCSM4 model	-0.5	-0.8	-1.2	-1.4	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.6	
ME'TEO FRANCE model	-0.8	-1.1	-1.2	-1.0	-0.9					
Japan Frontier Coupled model	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	
CSIR-IRI 3-model MME	-0.1	-0.3	-0.6	-0.7	-0.8	-0.6				
GFDL CM2.1 Coupled Climate model	-0.9	-1.1	-1.1	-0.9	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.7	
Canadian Coupled Fes Sys	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	-0.3	0	0.3	0.6	
GFDL CM2.5 FLOR Coupled model	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5	-0.2	0	0.3	0.6	
动力模式的平均值	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.3	

注: 每个值表示从 2017 年 9 月起预报的 3 个月滑动平均的结果, 所有动力模式预报结果的平均值见表最后一行, 此表可直接从 IRI 网站获取([http://iri.columbia.edu/ourexpertise/climate/forecasts/ens0/2017-Sep-quick-look/?ens0\\_tab=ens0-sst\\_table](http://iri.columbia.edu/ourexpertise/climate/forecasts/ens0/2017-Sep-quick-look/?ens0_tab=ens0-sst_table))

图 5 给出了 IOCAS ICM 从 2017 年 9 月的初始条件预报得到的 SST、纬向风应力和海表高度异常沿赤道的纬圈-时间分布。相关的水平分布如图 6 所示, 给出了不同阶段海表温度及风应力的空间分布特征。IOCAS ICM 的预报表明, 2017 年年末热带太平洋会处于一个 SST 冷异常态, 最大变冷区域主要集中在赤道东太平洋, 并于 2017 年年末达到顶峰, 从 Niño3.4 区海表温度异常指数来看, 这一变冷的程度不足以达到拉尼娜(La Niña)事件水平; SST 冷异常可能会在 2018 年春季逐渐减弱, 转化为中性状态。

### 3 IOCAS ICM 的改进和应用

IOCAS ICM 为 ENSO 的理论研究及实时预报提供了模式工具和模拟平台。近年来, 基于 IOCAS ICM 既进一步深化了对 ENSO 理论的认识, 为模式改进提供了理论依据, 又扩展了模式的应用, 将四维变分(4D-Var)资料同化方法及条件非线性最优扰动方法(CNOP; Mu *et al.*, 2003, 2010)等引入到 IOCAS ICM 中,

开展了 ENSO 可预报性及预报改进的研究。

#### 3.1 IOCAS ICM 与 4D-Var 方法相结合

资料同化是改进数值模拟和预报的有效方法, 它通过优化模式解和观测信息间的融合, 为模式提供一个最优的初始场, 从而提高模式对 ENSO 的模拟和预报水平。4D-Var 作为一种先进的资料同化方法, 具有坚实的数理基础, 将求解初始场问题转化为以模式动力约束为条件的目标函数的极小化问题, 它利用最优控制原理, 通过调整控制变量, 使得在给定的同化时间窗口中由控制变量得到的模式模拟结果与实际观测资料之间的偏差达到最小, 从而得到一个数学上和动力学上与模式更为协调的最优初始分析场。

我们已将 4D-Var 方法成功地引入到 IOCAS ICM 中, 开发了与 ICM 相应的切线性模式和伴随模式, 并设计了最优化方案; 对伴随模式和最优化方案的精确性进行了严格检验; 最终成功建立了一个基于 IOCAS ICM 的 4D-Var 资料同化系统, 并通过一系列

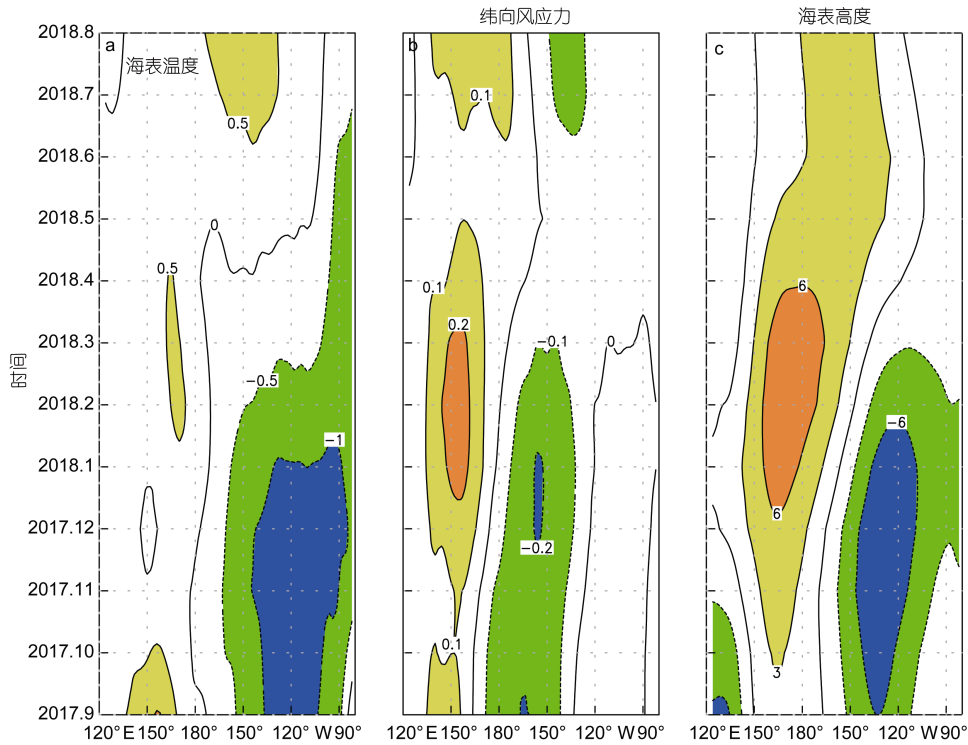


图 5 IOCAS ICM 从 2017 年 9 月的初始条件预报得到的海表温度(a)、纬向风应力(b)和海表高度异常(c)沿赤道的纬圈-时间分布

Fig.5 Zonal-time sections along the equator for anomalies of sea surface temperature (a), zonal wind stress (b), and sea level (c), predicted using the IOCAS ICM from the initial conditions on 1 Sep 2017

注: 其中海表温度的等值线间隔为 0.5°C, 纬向风应力的等值线间隔为 0.1dyn/cm<sup>2</sup>, 海表高度的等值线间隔为 3cm

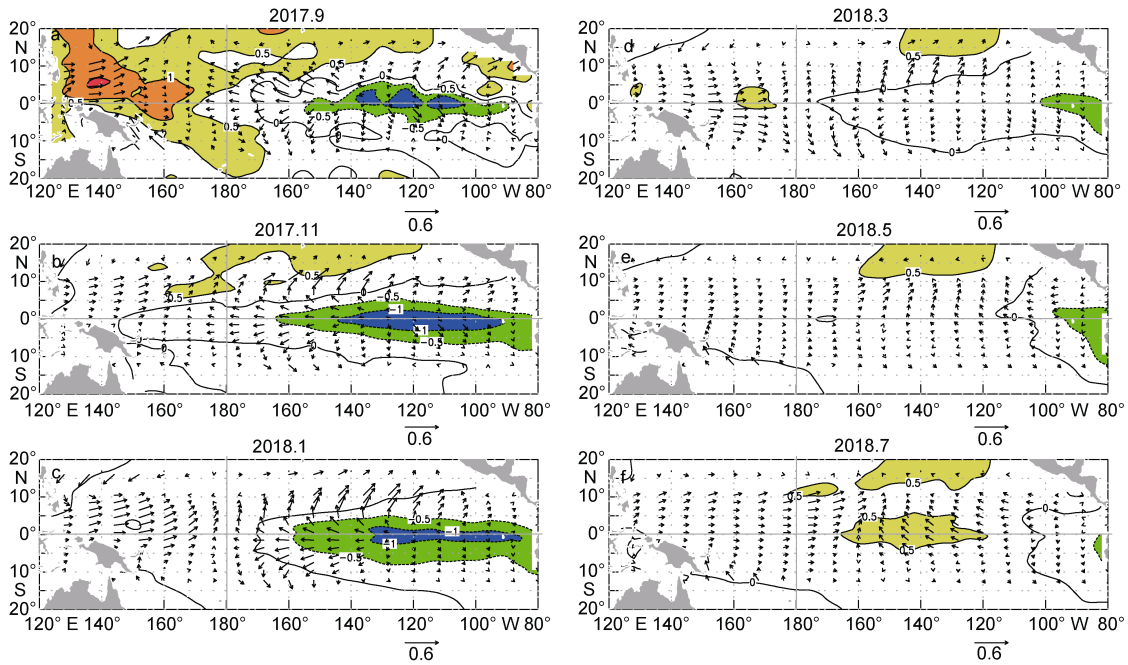


图 6 IOCAS ICM 从 2017 年 9 月的初始条件预报得到的海表温度和风应力(矢量)的水平分布

Fig.6 Horizontal distributions of sea surface temperature (SST) anomalies (contours) and wind stress anomalies (vectors) predicted using the IOCAS ICM from initial conditions on 1 Sep 2017

注: a: 2017 年 9 月; b: 2017 年 11 月; c: 2018 年 1 月; d: 2018 年 3 月; e: 2018 年 5 月; f: 2018 年 7 月。其中海表温度的等值线间隔为 0.5°C, 风应力的单位为 dyn/cm<sup>2</sup>



敏感性试验, 完成对该模式和 4D-Var 而言最佳的同化参数设置、组合等调试工作。此外, 基于已建成的 IOCAS ICM 的 4D-Var 同化系统在理想情景下进行了海表温度(SST)资料同化试验, 以得到最优初始场来改进 ENSO 模拟和预报(Gao *et al*, 2016)。影响模式预报的因素很多, 除了初条件的不确定性外, 模式参数同样会导致较大的预报误差。于是, 我们将 4D-Var 方法扩展至优化对 ENSO 有重要影响的关键模式参数, 如  $\alpha_{Tc}$  等, 在最优初始化的基础上进一步优化模式参数, 从而更为有效地改进 ENSO 实时预报水平(Gao *et al*, 2017b)。

通过 4D-Var 方法将观测的 SST 资料同化到 IOCAS ICM 的试验中, 同化模拟将 1990 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日的每天的 SST 观测资料于每月 1 日同化到模式中, 同化时间窗口为每月的天数, 同化周期为 26 年。例如, 模式从 1990 年 1 月 1 日开始积分, 将 31 天的观测的 SST(1990 年 1 月 1 日—31 日)同化到模式中, 得到 1990 年 1 月 1 日的最优初始

条件后, 自由积分模式, 至 1990 年 2 月 1 日, 将 28 天的观测的 SST(1990 年 2 月 1 日—28 日)同化到模式中, 得到 1990 年 2 月 1 日的最优初始条件后, 再自由积分; 以此类推, 直至 2015 年 12 月 1 日, 共计同化  $26 \times 12 = 312$  次。结果表明, 相较于未同化的试验(直接用观测的风应力异常驱动单独的海洋模式; 图 7b)而言, 同化试验(图 7c)模拟得到的 SST 异常沿赤道的纬圈-时间分布与观测(图 7a)更为一致。尽管用观测的风应力异常直接驱动, ICM 可以很好地模拟出与观测相似的 ENSO 基本特征, 但通过 4D-Var 方法进行同化可有效提高模式对 ENSO 的模拟水平。如对冷暖位相振幅的模拟更为合理, 在一定程度上改善了 IOCAS ICM 对 ENSO 事件模拟的系统性偏冷现象; 又如能够更为准确地模拟出 SST 异常时间演变的微小变化特征等。这样, 通过同化所得到的 SST 初条件的误差要小于未同化的试验, 可为 ENSO 预报提供更准确的初始条件。

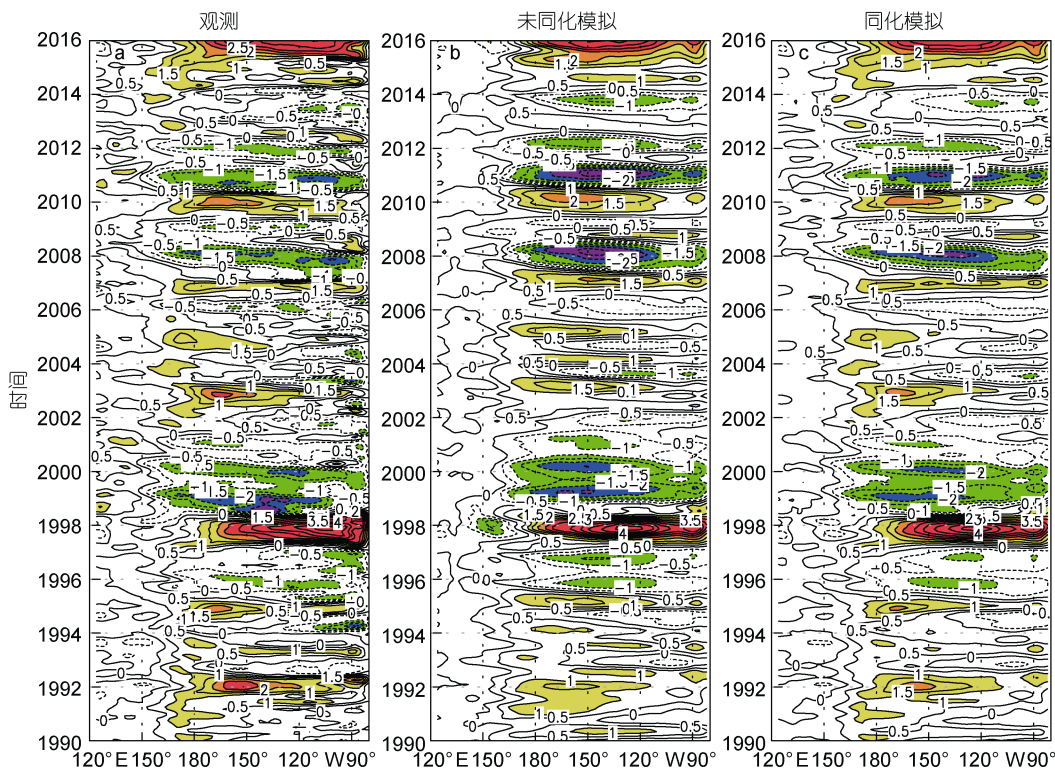


图 7 观测(a)、未同化(b)和同化(c)模拟得到的海表温度异常在 1990 年 1 月—2015 年 12 月间沿赤道的纬圈-时间分布  
 Fig.7 Zonal-time sections along the equator for sea surface temperature (SST) anomalies of Observation(a) and simulation by Non-assimilation (b) and Assimilation (c) from Jan. 1990 to Dec.2015  
 注: 其中海表温度的等值线间隔为 0.5°C

3.2 IOCAS ICM 与 CNOP 方法相结合  
 ENSO 的可预报性主要存在两类问题, 一是初始

误差随预报时间的增长, 二是模式误差对 ENSO 预报的不确定性。为了考察非线性对误差增长的影响, Mu

等(2003)提出了条件非线性最优扰动方法,随后推广至模式参数误差与扰动误差发展的关系(Mu *et al.*, 2010)。CNOP方法是一种优化方法,利用这种方法可以找到满足某一约束条件的最优扰动,这一扰动可以在预报时刻使得目标函数达到最大。目前,CNOP方法被广泛应用于 ENSO 可预报性研究及目标观测等方面。

我们利用 4D-Var 中的伴随模式为基础,成功将 CNOP 方法引入到 IOCAS ICM 中,揭示了模式中造成对 El Niño 预报最大不确定性的最优初始误差(CNOP-I)的时空特征,指出 SST 和 SL 的 CNOP-I 空间结构与预报初始时刻所在季节有关(图 8)。这些初始场误差会产生类似 Bjerknes 正反馈机制以及温跃层反馈机制,从而产生类似 La Niña 模态的误差演变过程。考虑 CNOP-I 引起的季节性误差增长,表现出

较强的春季预报障碍现象(SPB)。针对 CNOP-I 误差极值的局地性特征,揭示了 IOCAS ICM 对 ENSO 预报的敏感区主要集中在中西太平洋表层以及东太平洋次表层,这为目标观测提供了理论指导(Tao *et al.*, 2017)。特别是,考虑随季节变化的 CNOP-I 空间结构,因此建议采用随季节变化的适应性观测来改善预报模式的初始场,这样会更有效提高模式对 El Niño 的预报能力,并能有效减弱春季预报障碍现象。

将 CNOP 方法与 IOCAS ICM 相结合,可确定初始误差最快增长区域和其与观测资料空间分布间的相互关联,识别初始场的敏感区域(即目标观测);还可研究模式参数敏感性问题,寻求模式参数的最优组合条件;并且可通过误差订正方法有效改进 IOCAS ICM 对 2015 年 El Niño 事件的回报(Zhang *et al.*, 2017b)。

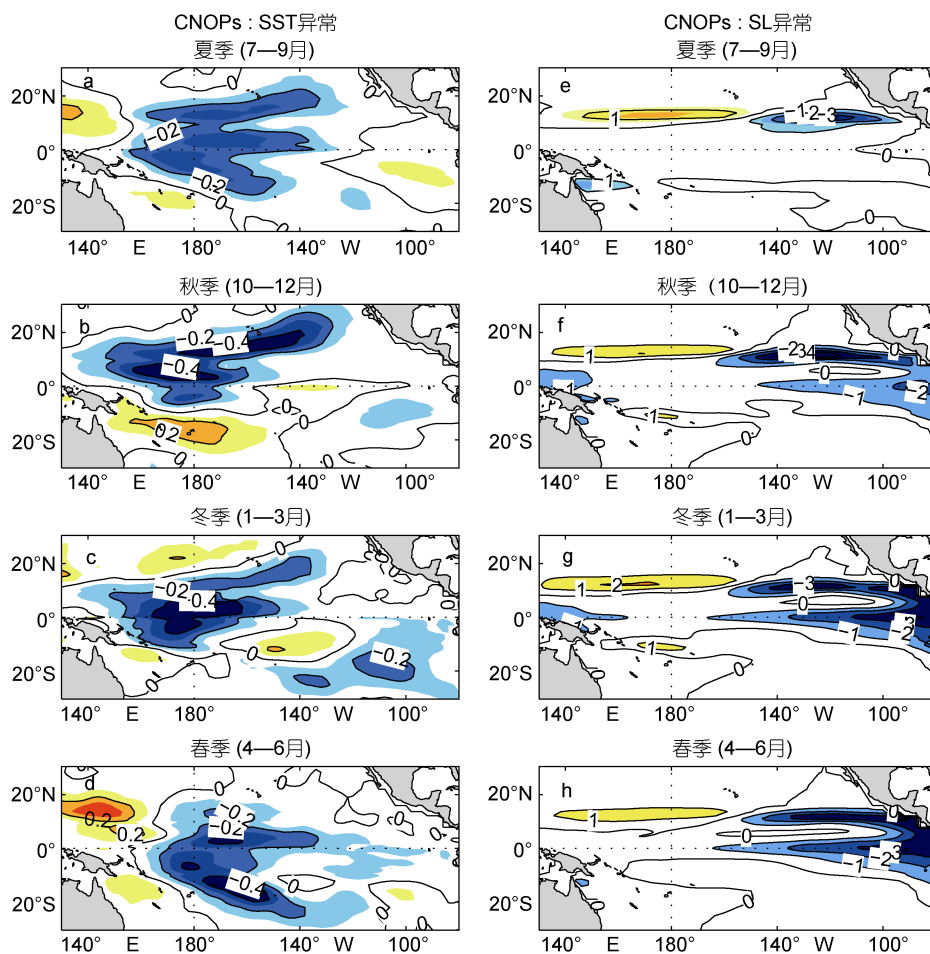


图 8 CNOP 型初始误差空间分布: 海表温度异常(a—d),海表高度异常(e—h)

Fig.8 Horizontal distributions of CNOP-type initial errors for SSTA (a—d) and SLA(e—h)

注: 其中海表温度的等值线间隔为  $0.2^{\circ}\text{C}$ , 海表高度的等值线间隔为  $1\text{cm}$ 。IOCAS ICM 中 CNOP-I 表现出明显的季节依赖性, 从上到下分别给出了在夏季、秋季、冬季和春季开始预报的最优初始场误差的集合分布

## 4 结论

以中国科学院海洋研究所冠名的中等复杂程度海气耦合模式(IOCAS ICM), 每月定期进行 ENSO 实时预报, 其结果目前收录于美国哥伦比亚大学国际气候研究所(IRI), 以作进一步的集成分析和应用(详情请见: <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/ens0/current/>), 这是首个以我国国内机构命名的海气耦合模式为国际学术界提供 ENSO 实时预报结果。IOCAS ICM 为 ENSO 分析和预报打造了一个创新的模式平台, 该模式性能优良, 能准确预报出 2014—2016 年 El Niño 事件的发展演变过程(Zhang *et al.*, 2016b), 并揭示了 2015 年 El Niño 事件二次变暖的物理过程(Zhang *et al.*, 2017a); 揭示了次表层上卷到混合层海水温度( $T_e$ )场在 ENSO 循环中的重要作用, 提出了 ENSO 事件起源的一个新机制(Zhang *et al.*, 2016a); 阐明了大气风场强迫和次表层热力强迫在 2010—2012 年 La Niña 事件的二次变冷现象中起同等重要的作用(Gao *et al.*, 2017a), 为改进 ENSO 预报提供理论依据。

IOCAS ICM 和其他海气耦合模式的最新预报结果(以 2017 年 9 月为初条件)表明, 2017 年年末热带太平洋会处于一个 SST 冷异常态, 最大冷异常中心主要集中在赤道东太平洋。从 Niño3.4 区海表温度异常指数来看, 这一变冷的趋势并不足以达到拉尼娜(La Niña)事件水平, SST 冷异常可能会在 2018 年春季逐渐减弱, 转化为中性状态。

目前我们已将 4D-Var 资料同化方法引入到 IOCAS ICM 中, 成功建立了基于 IOCAS ICM 的 4D-Var 同化系统, 有效改善了模式对 ENSO 的模拟和预报效果; 并且将条件非线性最优扰动(CNOP)方法应用到 IOCAS ICM 中, 确定初始误差最快增长区域和其与观测资料空间分布间的相互关联, 识别初始场的敏感区域(即目标观测), 通过误差订正方法有效改进 IOCAS ICM 对 2015 年 El Niño 事件的回报。

未来将进一步完善基于 IOCAS ICM 的 4D-Var 资料同化系统, 考虑多变量同化以及耦合同化等, 切实提高 IOCAS ICM 的实时预报水平; 并且基于 4D-Var 同化技术, 考察 CNOP 相关的目标观测试验对 ENSO 实时预报技巧的改善效果, 将二者结合进行有效的同化, 为预报提供更为协调一致的初始场, 进而更为有效地改进 ENSO 预报; 此外, 将集合卡尔曼滤波(EnKF)方法引入到 IOCAS ICM 中, 开展集合预

报试验, 与 4D-Var 同化方法相比较, 给出最佳的同化方案以改进 ENSO 实时预报。

由于 ENSO 过程复杂多变, 受多种因素的影响, 因此, 我们将不断地对 IOCAS ICM 进行改进。如将进一步扩充 IOCAS ICM 的区域至包括印度洋和大西洋在内的整个热带海区, 综合考虑印度洋海气过程对 ENSO 事件的影响; 将盐度效应和海气界面淡水通量强迫作用引入到 ICM 中, 以表征其对 ENSO 动力过程和预报的重要影响; 将随机风场(如西风爆发事件 WWBs)强迫作用引入到 ICM 中, 以考虑大气随机过程对 ENSO 的影响, 等等, 从而提高模式对 ENSO 的实时预报水平。

## 参 考 文 献

- 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳等, 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系. *气象学报*, 66(5): 808—825
- 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
- 刘屹岷, 刘伯奇, 任荣彩等, 2016. 当前重大厄尔尼诺事件对我国春夏气候的影响. *中国科学院院刊*, 31(2): 241—250
- 李崇银, 穆 穆, 周广庆等, 2008. ENSO 机理及其预测研究. *大气科学*, 32(4): 761—781
- 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
- 巢纪平, 袁绍宇, 2003. 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
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞等, 1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨. *气候与环境研究*, 3(4): 300—313
- Bjerknes J, 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific. *Monthly Weather Review*, 97(3): 163—172
- Chen D K, Zebiak S E, Busalacchi A J *et al.*, 1995. An improved procedure for El Niño forecasting: Implications for predictability. *Science*, 269(5231): 1699—1702
- Chen D K, Cane M A, Kaplan A *et al.*, 2004. Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*, 428(6984): 733—736
- Gao C, Wu X R, Zhang R H, 2016. Testing a four-dimensional variational data assimilation method using an improved intermediate coupled model for ENSO analysis and prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(7): 875—888
- Gao C, Zhang R H, 2017a. The roles of atmospheric wind and entrained water temperature ( $T_e$ ) in the second-year cooling of the 2010-12 La Niña event. *Climate Dynamics*, 48(1—2): 597—617
- Gao C, Zhang R H, Wu X R *et al.*, 2017b. Idealized experiments for optimizing model parameters using a 4D-Variational method in an intermediate coupled model of ENSO. *Advances in Atmospheric Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00376-017-7109-z>

- Keenlyside N, Kleeman R, 2002. Annual cycle of equatorial zonal currents in the Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C8): 8-1—8-13
- Levitus S, 1982. *Climatological atlas of the World Ocean*. NOAA Prof. Pap. 13, Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 173
- McCreary J P, 1981. A linear stratified ocean model of the equatorial undercurrent. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 298(1444): 603—635
- Mu M, Duan W A, Wang J C, 2002. The predictability problems in numerical weather and climate prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19(2): 191—204
- Mu M, Duan W S, Wang B, 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10(6): 493—501
- Mu M, Duan W, Wang Q *et al*, 2010. An extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17(2): 211—220
- Philander S G H, Pacanowski R C, Lau N C *et al*, 1992. Simulation of ENSO with a global atmospheric GCM coupled to a high-resolution, tropical Pacific Ocean GCM. *Journal of Climate*, 5(4): 308—329
- Reynolds R W, Smith T M, 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of Climate*, 7(6): 929—948
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M *et al*, 2002. An improved *in situ* and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15(13): 1609—1625
- Tao L J, Zhang R H, Gao C, 2017. Initial error-induced optimal perturbations in ENSO predictions, as derived from an intermediate coupled model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(6): 791—803
- Zhang R H, Zebiak S E, Kleeman R *et al*, 2003. A new intermediate coupled model for El Niño simulation and prediction. *Geophysical Research Letters*, 30(19): OCE 5-1—OCE 5-4
- Zhang R H, Busalacchi A J, 2005a. Interdecadal change in properties of El Niño-Southern Oscillation in an intermediate coupled model. *Journal of Climate*, 18(9): 1369—1380
- Zhang R H, Zebiak S E, Kleeman R *et al*, 2005b. Retrospective El Niño forecasts using an improved intermediate coupled model. *Monthly Weather Review*, 133(9): 2777—2802
- Zhang R H, DeWitt D G, 2006. Response of tropical Pacific interannual variability to decadal entrainment temperature change in a hybrid coupled model. *Geophysical Research Letters*, 33(8): L08611
- Zhang R H, Zheng F, Zhu J *et al*, 2013. A successful real-time forecast of the 2010-11 La Niña event. *Scientific Reports*, 3: 1108, <http://dx.doi.org/10.1038/srep01108>
- Zhang R H, Gao C, Kang X B *et al*, 2015. ENSO modulations due to interannual variability of freshwater forcing and ocean biology-induced heating in the tropical Pacific. *Scientific Reports*, 5: 18506, <http://dx.doi.org/10.1038/srep18506>
- Zhang R H, Gao C, 2016a. Role of subsurface entrainment temperature ( $T_e$ ) in the onset of El Niño events, as represented in an intermediate coupled model. *Climate Dynamics*, 46(5—6): 1417—1435
- Zhang R H, Gao C, 2016b. The IOCAS intermediate coupled model (IOCAS ICM) and its real-time predictions of the 2015-16 El Niño event. *Science Bulletin*, 61(13): 1061—1070
- Zhang R H, Gao C, 2017a. Processes involved in the second-year warming of the 2015 El Niño event as derived from an intermediate ocean model. *Science China Earth Sciences*, 60(9): 1601—1613, <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-016-0201-9>
- Zhang R H, Tao L J, Gao C, 2017b. An improved simulation of the 2015 El Niño event by optimally correcting the initial conditions and model parameters in an intermediate coupled model. *Climate Dynamics*, 10(6): 1196, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-017-3919-z>
- Zhu J S, Zhou G, Zhang R H *et al*, 2013. Improving ENSO prediction in a hybrid coupled Model with an embedded entrainment temperature parameterisation. *International Journal of Climatology*, 33(2): 343—355

## THE IOCAS ICM AND ITS IMPROVEMENTS IN REAL-TIME ENSO PREDICTIONS

GAO Chuan<sup>1,2</sup>, WANG Hong-Na<sup>1,2</sup>, TAO Ling-Jiang<sup>1,3</sup>, ZHANG Rong-Hua<sup>1,2,3</sup>

(1. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*  
2. *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;* 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** El Niño and Southern Oscillation (ENSO), the strongest signal of interannual variability on the Earth, and have great impacts on climate and weather worldwide. It is of great practical significance to accurately and effectively make real-time ENSO prediction. An intermediate coupled model (ICM) is used at the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS), named the IOCAS ICM, to predict the sea surface temperature (SST) evolution in the tropical Pacific. Recently, the IOCAS ICM has been routinely used to predict the real-time ENSO events, whose result are collected by the International Research Institute for Climate and Society (IRI) for further analyses and application. The atmosphere component of the IOCAS ICM is an empirically statistical wind stress anomaly model, and represents the response of wind stress anomaly to the SST anomaly field. The IOCAS ICM includes three modules of a dynamic ocean model, an SST anomaly model incorporated into the dynamic ocean model and a  $T_e$  (the temperature of subsurface water entrained into the mixed layer) model. One distinguishing feature of the IOCAS ICM is an empirical parameterization of  $T_e$ . This novel approach can effectively improve the simulation and prediction of the SST evolution in the tropical Pacific. Recent prediction results (predicted from September 2017) with IOCAS ICM and other coupled model show that the SST in tropical Pacific gradually evolves into cold condition, with its large anomaly being centered in the eastern Pacific. But the strength of the coldness may not reach the level of La Niña event. The cold SST condition may be gradually weakened in the spring 2018 and become a normal condition. Additionally, the applications of four dimensional variational (4D-Var) data assimilation method and the conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) approach into the IOCAS ICM are also discussed.

**Key words** IOCAS ICM; real-time ENSO prediction; data assimilation; CNOP approach