

# 四维变分同化技术在优化 Z-C 预测模式 初始场中的应用试验\*

端义宏 梁旭东 李永平

(上海台风研究所, 上海, 200030)

王东晓

(中国科学院南海海洋研究所, 广州, 510301)

## 摘 要

文中使用四维变分同化技术将海温观测资料同化到 Zebiak-Cane 模式中, 通过优化模式的初始场提高了模式的预报技巧。通过用理想场进行检验, 说明所建立的同化伴随模式是正确的。用文中建立的四维变分同化模式以 1997 年 1 月为初始场所做的预报结果与实况相比, 结果较好。这对今后 ENSO 预报打下了良好的基础。

关键词: Zebiak-Cane 模式, 四维变分资料同化, ENSO 预测。

## 1 引 言

ENSO 事件对大气的年际变化起着非常重要的作用, 对此 Bjerknes<sup>[1]</sup>和 Horel<sup>[2]</sup>等对于与 ENSO 事件相关的大气的异常变化已进行较为深入的研究。对 ENSO 事件较为成功的数值模拟应从 Cane 等建立的海气耦合模式(简称 Z-C 模式)开始<sup>[3]</sup>, 此后发展起来的海气耦合模式对 ENSO 事件的模拟取得了一定的进展, 同时也被应用到 ENSO 事件的动力预测中。但由于海洋观测资料的缺乏和简单海气耦合模式对初始场的处理较简单, 而模式的初始场的好坏对预报结果又有很大的影响, 因而如何对简单海气耦合模式的初始场进行优化正受到广泛的关注。近年来, 气象学者正试图从各方面对简单海气耦合模式进行改进。如 Kleeman 等<sup>[4]</sup>的研究表明, 在海气耦合模式中使用资料同化技术使预报结果有明显的改善。Chen 和 Zebiak 等<sup>[5]</sup>在 Z-C 模式的初始化过程中应用松弛方法, 使用模式产生的风应力和观测的风应力场共同强迫海洋部分, 这样得到的初始场在一定程度上改善了模式的预报结果。Z-C 模式被认为有较好的预报技巧, 其综合预报技巧并不低于复杂的海气耦合环流模式, 但其对 1990 年代的海温距平的预报技巧却很低, 这可能是由于 Z-C 模式在预报时使用的初始场一般是使用预报前期的风应力强迫海洋来得到的, 这样显然忽略了在预报初始时刻海洋的真实状况。本文使用变分同化技术将模式预报前期较长的一段时间内的海温距平同化到模式中, 用以改善模式的初始场并且使模式在预报前的一段

\* 初稿时间: 1999 年 6 月 30 日, 修改稿时间: 1999 年 11 月 17 日。

资助课题: 国家“九·五”重中之重 96-908-02-05 专题和自然科学基金课题 49705063。

较长时间内的海温距平预报与真实状况尽量接近, 通过这种改进可以得到较好的预报结果。

资料同化方法中较有代表性的有张弛插值(nudging)、最优插值(OI)、Kalman 滤波和变分同化技术(variational assimilation technique)等。变分同化技术是在 1970 年代引入气象研究的<sup>[6,7]</sup>。为了克服资料同化中 Kalman 滤波和最优插值等方法存在的动力学过于简化、计算存储过分庞大等问题, Lewis 和 Derber<sup>[8]</sup>以及 Le Dimet 和 Talagrand 变分资料同化的伴随方法用于气象学数值分析和预报中, 这为四维变分同化技术开辟了广阔的应用前景。Thacker 和 Long<sup>[10]</sup>又将这种方法用于解决海洋学问题, 研究表明, 变分资料同化方法能够有效地提高动力模式对 ENSO 现象的模拟能力<sup>[4]</sup>。

本文将四维变分同化技术应用到预测 ENSO 的简单海-气耦合模式中, 建立 Z-C 模式的伴随模式, 并用理想化的数值试验检验了伴随模式的可靠性, 经同化改善模式的初始场提高了, 对 ENSO 事件的预测能力。

## 2 四维变分同化技术简介

四维变分同化技术是通过调整模式的初始场以及模式参数来进行资料同化的<sup>[11]</sup>。将预报模式表示为

$$F(x) = \frac{dx}{dt}$$

$x$  为模式变量, 假定模式的初始场为  $u$ 。定义以下目标函数

$$f = \int_{t_0}^{t_1} [x(t) - x^0(t)]^T w [x(t) - x^0(t)] dt$$

其中  $x(t)$  为  $t$  时刻的模式预报值,  $x^0(t)$  为  $t$  时刻的观测值,  $T$  代表转置运算,  $w$  为权重系数阵, 理论上为各变量的观测误差协方差阵,  $t_0$  为模式同化时积分的初始时刻,  $t_1$  模式同化时积分的结束时刻, 该目标函数度量了模式预报值与观测值之间的“距离”, 同化的目的是找到模式的合适的初始场使得目标函数达到极小值, 即模式的预报结果与观测值接近。根据理论推导<sup>[11]</sup>, 目标函数  $f$  相对与初始场  $u$  的梯度  $\dot{y}_{uf}$  可表示为

$$\dot{y}_{uf} = \int_{t_0}^{t_1} R^*(t, t_0) \dot{y}_{x(t)f} dt$$

其中  $R^*(t, t_0)$  为预报模式  $F(x)$  的共轭模式,  $\dot{y}_{x(t)f}$  为目标函数  $f$  相对对模式预报值  $x(t)$  的梯度, 由上式可见, 通过积分预报模式的共轭模式即可得到目标函数相对于初始场的梯度, 得到目标函数相对于初始场的梯度后即可用下降算法

$$u_{n+1} = u_n + \rho_n D_n$$

来由第  $n$  次迭代的初始场  $u_n$  得到使目标函数值减小的第  $n+1$  步的初始场  $u_{n+1}$ ,  $\rho_n$  为迭代步长,  $D_n$  为第  $n$  步的下降方向, 在最速下降算法中  $D_n$  即为梯度的反方向, 在共轭梯度算法中

$$D_{n+1} = G_{n+1} - \frac{D_n^T G_{n+1}}{D_n^T D_n} D_n$$

式中  $G_{n+1}$  为第  $n+1$  次迭代的梯度的反方向,  $T$  代表转置。

伴随模式可使用伴随码的方法直接由原模式导出, 本文使用该方法推导出了 Z-C 模式的伴随模式。利用原模式和伴随模式形成 Z-C 模式预报初始场的过程如下(图 1)。

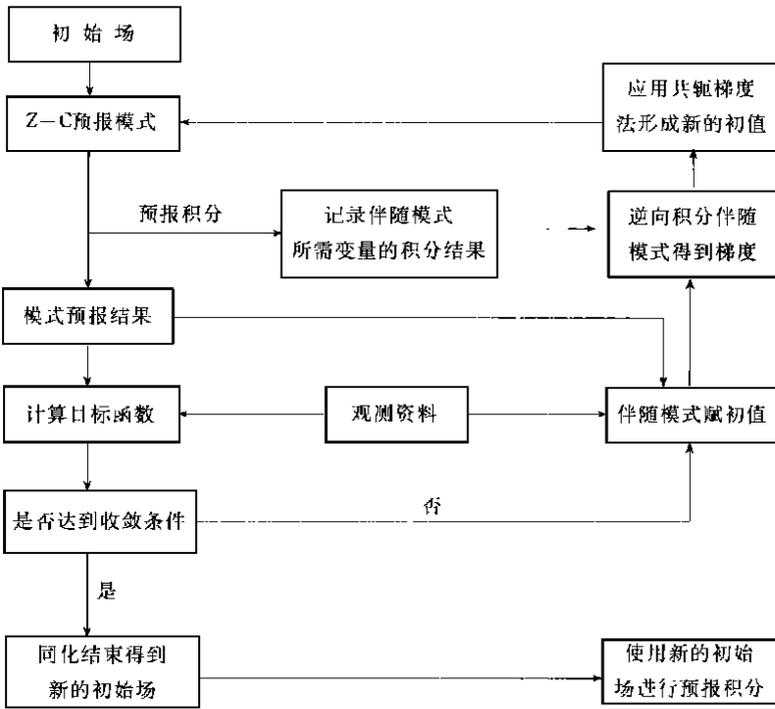


图 1 使用伴随四维同化方法的 Z-C 模式运行示意图

在同化时先将初估场代入 Z-C 预报模式积分, 同时保存每个积分步的结果, 把模式积分结果与观测场代入目标函数计算出目标函数值, 并由模式积分结果与观测值的差形成伴随变量的初值代入伴随模式, 反向积分伴随模式得到目标函数相对于初始场的梯度, 构造共轭梯度作为下降方向, 根据下降方向修正初始场以形成新的初始场, 这样完成一次迭代, 再将新的初始场代入预报模式重复以上迭代, 直至目标函数不再下降或达到限定的最大迭代步数为止, 本文选用两次迭代的目标函数值之差小于 0.001 时结束同化, 最后得到同化结果, 即获得使目标函数达到(或接近)极小的新的初始场, 再进行 Z-C 原模式的预报积分。

### 3 伴随模式的检验

为了检验伴随模式及整个同化系统的正确性和可靠性, 使用所建立的同化系统, 应用一组理想场进行了数值试验, 选定目标函数为

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (SSTA^M - SSTA^O)^T W (SSTA^M - SSTA^O)$$

$SSTA^M$  为海表温度异常的模式预报结果,  $SSTA^O$  为海表温度异常的观测值, 为简便起见, 将权重系数矩阵  $W$  取为单位矩阵,  $(m, n)$  为模式的网格,  $f$  可看作模式预报结果与观测值

的方差。在 Z-C 模式中参数 NIC 决定了模式是否自动产生风应力距平, TAMP1 决定了模式自动产生的风应力距平的强度。为了得到理想观测场, 将参数 NIC 定为 4, 模式将在初始场中自动产生风应力距平, 将 TAMP1 定为 0.5, 这样在积分的初始时刻模式将自动在赤道中西太平洋产生  $0.5 \text{ m/s}$  的西风异常(以下称为较强的西风异常)并产生相应的风应力距平场, 以此风应力距平场作为初始场将模式积分 10 个月得到海温距平的预报场, 将此海温距平场作为理想的观测场。同时将参数 NIC 定为 4, TAMP1 定为 0.2 模式将自动产生  $0.2 \text{ m/s}$  的西风异常(以下称为较弱的西风异常), 以该西风异常作为初始场将预报模式积分 3 个月得到的风应力距平场作为同化使用的初估场(有误差的初始场), 将该初估场代入同化系统, 希望经过同化后得到的预报结果与理想的观测场充分地接近, 用以检验伴随同化模式的正确性。

### 3.1 假想观测场和初估场的设计

赤道中西太平洋西风异常的存在对 El Niño 现象的发生发展起着十分重要的作用。将较强的西风异常产生的风应力距平场(见图 2a)输入预报模式积分 10 个月(初始时刻为 1 月份), 得到 11 月的 SSTA 场(见图 2b), 在 Nino3 区( $5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}, 150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$ )出现了 4 以上的正距平, 在  $120^{\circ}\text{W}$  有 5.5 的高中心, 暖舌向西延伸到  $170^{\circ}\text{E}$  附近。将此 SS-

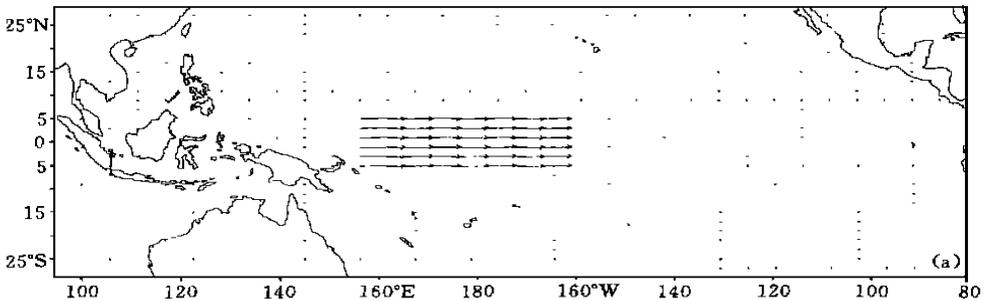


图 2a 较强的西风应力距平场( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

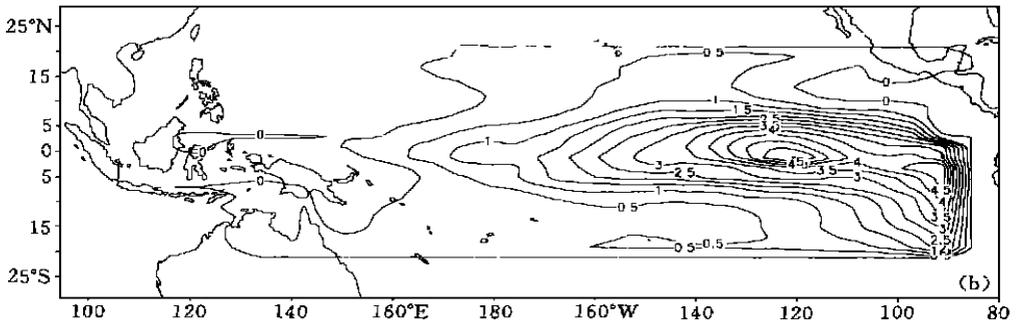


图 2b 由较强西风应力距平场积分 10 个月的 SSTA 预报场(作为观测场)( )

TA 场作为假想的观测场。

初估场是 1 月份在赤道中西太平洋加上一相对弱的西风距平( $0.2 \text{ m/s}$ )并在预报模

式中积分 3 个月, 将得到的一个较为完整的风应力距平场(图 3a) 作为初估场。在该初估场中, 赤道中西太平洋有  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$  左右的风应力距平值, 将此初估场作为 1 月份的初始场输入预报模式积分 10 个月, 得到 11 月的 SSTA 场(见图 3b), 很显然在初始西风扰动较弱时积分得到的 SSTA 场与理想的观测场(图 2b) 有很大的差异, 在整个赤道太平洋为弱的海温负距平, 在赤道东太平洋有  $-0.8$  的闭合中心, 而在理想的观测场(图 2b) 中,

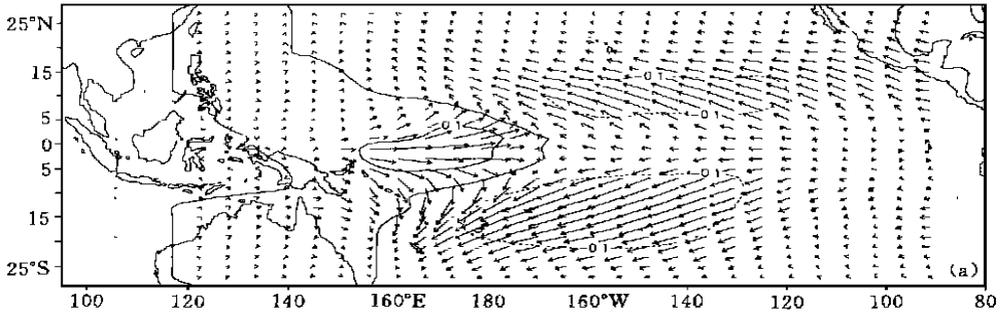


图 3a 同化使用的风应力距平初估场( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

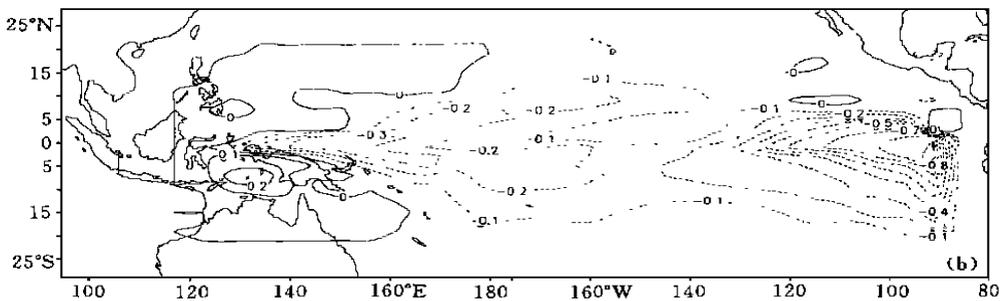


图 3b 由初估场积分 10 个月以后的 SSTA 场( )

赤道太平洋处于明显的高海温状态。

### 3.2 经伴随模式同化后结果分析

将上述初估场代入同化系统最后得到新的初始场。将每次迭代得到的目标函数值除以目标函数的初始值将目标函数值标准化。同化的结果可看出目标函数在迭代第一步后下降到 0.5 左右, 在前几次迭代中目标函数下降很快(见图 4a), 到第 8 步以后已下降很少, 同化结束后目标函数下降到 0.07 左右(也即是目标函数初始值的 7% 左右), 可见迭代收敛较好。同化结束后的初始风应力场如图 4b 所示。

经过对比可见, 同化后的初始风应力场(图 4b) 相对于同化使用的初估场(图 3a) 而言, 在赤道中西太平洋出现了较强的西风应力, 其结构和大小与作为观测场的初始风应力距平场(图 2a) 已很接近, 在赤道中东太平洋有  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$  的西风距平区, 该西风距平区与图 2a 中的西风距平区在大小、位置和结构上都很接近。用同化以后的初始场在预报模式中积分 10 个月以后的 SSTA 场(图 4c) 与假设的观测场(图 2b) 相比较可见, 在赤道中东

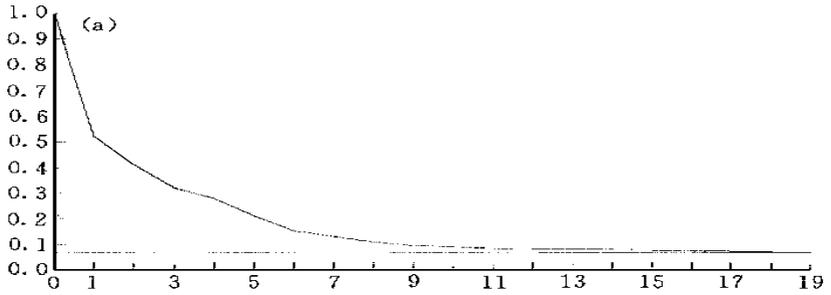


图 4a 目标函数值的下降曲线

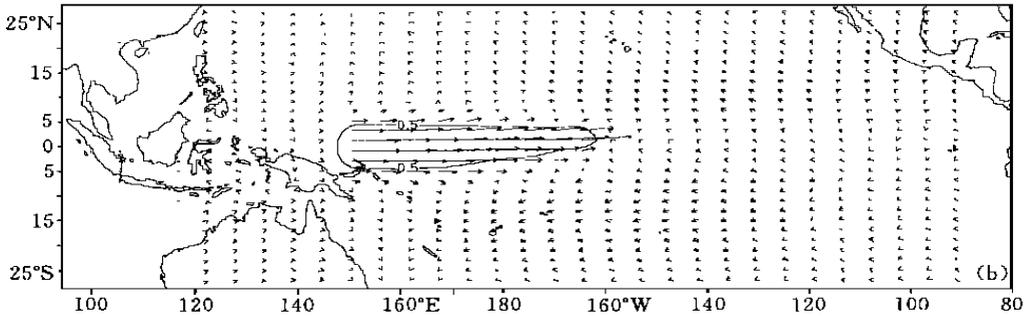


图 4b 同化结束后的初始风应力距平场

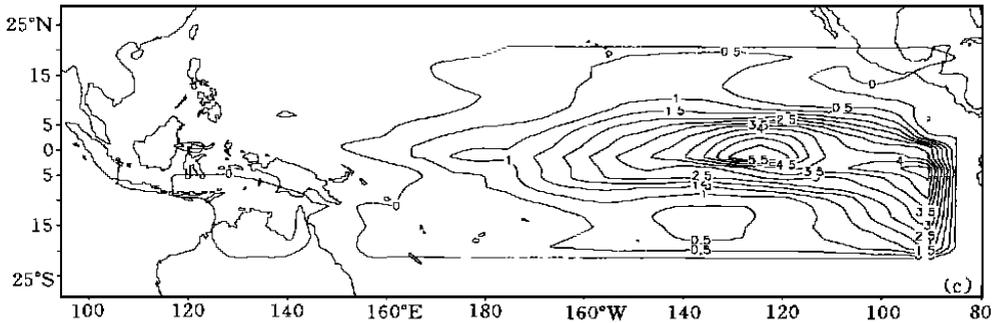


图 4c 同化结束后的 SSTA 场预报结果( )

太平洋的也出现了 4 以上的正距平, 在 130°W 附近有 5.5 的闭合高中心, 暖舌向西延伸到 170°E 附近, 与理想的观测场非常接近, 这与目标函数值的下降是一致的。从梯度的模的变化(图 4d)也可看出, 梯度的模从  $10^8$  的量级下降到了  $10^1$  的量级, 因而, 用伴随同化方法取得了很好的效果。

#### 4 个例模拟及预测

1997~1998 年强厄尔尼诺事件对全球气候造成了极大的影响, 这期间, 太平洋东岸

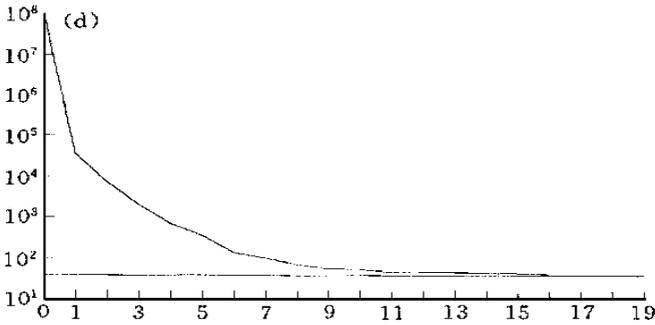


图 4d 梯度的模随迭代次数的变化

的智利、秘鲁、阿根廷等国先后多次洪水泛滥, 加勒比海的洪都拉斯、海地、巴拿马等出现了严重的高温干旱天气, 太平洋西部的泰国遭受了近 90 a 来最严重的干旱, 中国的部分地区遭受了百年一遇的特大洪水。从这次厄尔尼诺的发展可以看出其强度超过了 1982~1983 年的厄尔尼诺, 在 1997 年 3 月南美沿岸海平面温度比正常高出 1 以上, 5 月份, 赤道太平洋海面温度大范围异常偏高 1~3, Nino3 区的平均海温已比正常高出 1.4, 厄尔尼诺已经形成。在此之后, 厄尔尼诺强度迅速加强, 从 Nino3 区的平均海温来看, 6 月份已比正常高出了 2 以上, 8 月份开始高出 3 以上, 11 月偏高达 3.8, 其异常程度已超过 20 世纪最强的 1982~1983 年厄尔尼诺事件 3.6 的峰值。12 月赤道东太平洋部分海域海温异常偏高超过 5, Nino3 区偏高 3.9, 成为这次事件海温异常的最高值, 随后该区域的海温从 1 月份开始迅速下降, 5 月份仅偏高 1.6, 6 月份就降到了正常以下, 随后出现了海温负距平。

对这次事件使用本文建立的伴随同化方法进行了模拟预测试验。使用的风应力场是 NECP(美国国家环境预测中心)的分辨率为  $2^\circ \times 2^\circ$  范围为 140 E~80 W, 29 S~29 N 的伪风应力资料, 海温资料是中国气象局国家气候中心提供的分辨率为  $5^\circ \times 5^\circ$  10 以北的太平洋海温资料。

图 5 是使用 1997 年 1, 2, 3 月的平均风应力距平场强迫模式 3 个月, 然后预报积分 9 个月得到 1997 年 12 月的 SST A 的预报结果。

由图 5 可见在未进行实测资料同化时, 模式没有模拟出观测到的赤道太平洋的较强的海温正距平。图上显示在赤道中西太平洋是弱的海温正距平, 闭合高中心为 0.1。赤道东太平洋为弱的海温负距平, 130 W 附近有 -0.2 的闭合中心。

使用 1997 年 6, 9 和 12 月的月平均海温距平进行同化处理, 其中图 6 给出了 12 月的观测资料。图 7 是同化时的目标函数随迭代次数的下降曲线。从图 7 看出, 目标函数开始下降很快, 到同化结束时下降到了 0.3 左右。图 8 给出了同化结束后的 1997 年 12 月的 SST A 场, 从图 8 可以看出, 伴随同化方法已能较好地模拟出赤道太平洋的海温正距平, 在图 8 中整个赤道太平洋海温为正距平, 赤道中东太平洋出现了 3 以上的正距平, 而在未进行同化时赤道东太平洋是弱的负距平(见图 5), 可见同化后的模拟结果与观测更接近。图 9 给出了使用同化后初始场、未同化时初始场积分 36 个月(1997 年 1 月到 1999 年

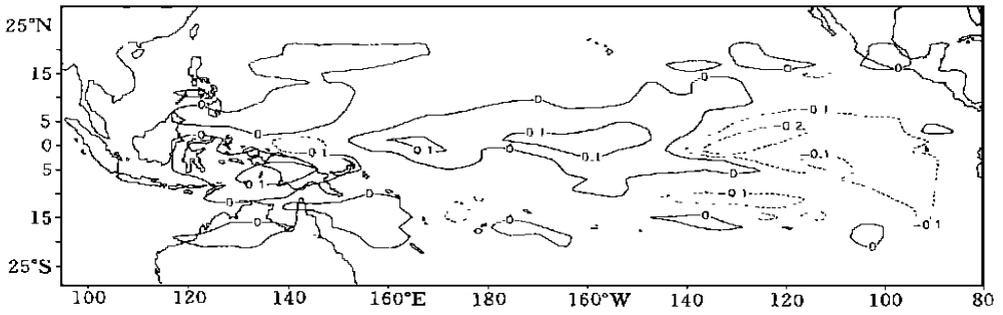


图5 未使用同化时的1997年12月海温距平( )预报结果  
(初始场为1997年1,2,3月的平均风应力距平场)

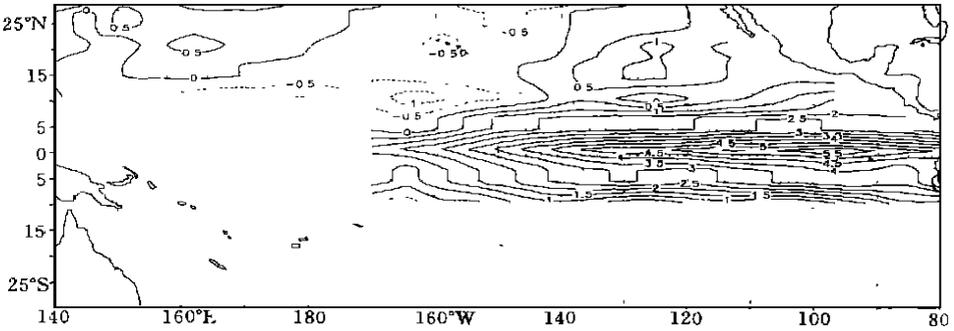


图6 1997年12月的海温距平观测资料( )

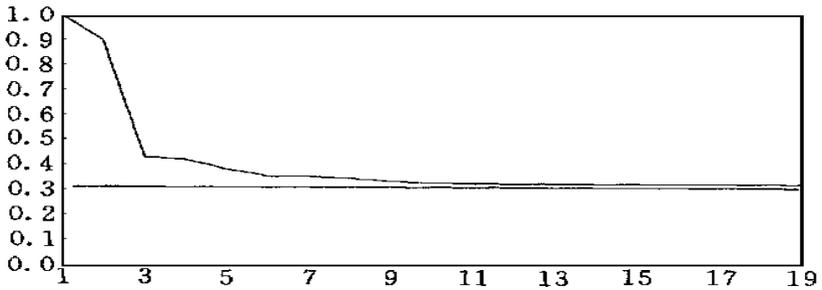


图7 目标函数值随迭代次数的下降曲线

12月)得出的 Nino3 指数和观测值(其中1997年1月到1999年1月的观测值摘自《气候监测公报》测公报》\*,1999年2月~1999年9月的观测值由 ENCP 海温再分析资料计算)。从图9中可以看出,Nino3 区的观测值在1998年5~6月有急剧的下降,在1998年6

\* 国家气候中心诊断室,《气候监测公报》1997.10, Vol.10-1999 Vol.1.

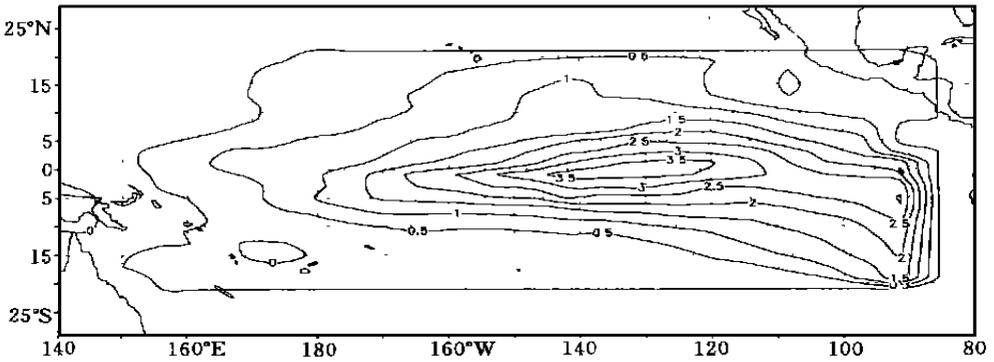


图8 同化后的海温距平值( ) (1997年12月)

月出现了海温负距平, 随后 Nino3 区的海温持续下降, 在 1998 年 12 月达到的  $-1.3$  , 在

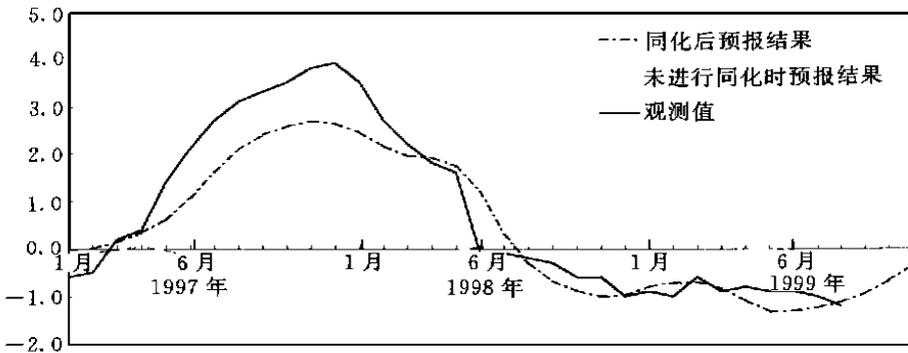


图9 Nino3 指数的预报结果  
(1997年1月到1999年12月)

此后, 直到 1999 年 9 月基本维持在  $-1.2$  左右。同化后模拟出的 1997 年的 Nino3 区的海温距平值强度略低于观测值, 两者相差  $1.1$  , 但在趋势上与观测值很接近。从模式预测的结果来看, 预测的 Nino3 指数转负的月份与实况相比只差 1 个月, 到 1998 年 7 月开始出现负距平值, 此后迅速减弱到与实况一致, 在下降趋势和数值上都与观测很接近, 在 1998 年 12 月同样达到了  $-1.3$  左右, 直到 1999 年 9 月仍与实际的 Nino3 指数保持一致, 而预报的时效已达到了 20 个月。由此可以看出, 同化不仅模拟出了 1997 ~ 1998 年的 El Niño 期间 Nino3 指数的变化, 而且对 El Niño 的结束和 La Niña 的开始和维持也预报得较好。因此将海温观测值同化到 Z-C 模式中对提高 ENSO 的预测精度有了明显的改善。

## 5 结 论

本文利用共轭码方法建立了 Z-C 简单海气耦合模式的伴随模式, 并在此基础上建立了四维变分同化预测模式。经用理想化的扰动场作为实际观测场, 进行理想化的试验, 证明了共轭码方法导出的伴随模式的可靠性。该同化系统具有较强的同化能力, 这为应用

实际资料同化并进行预报、最优扰动分析等打下了基础。用本文建立的四维同化预测模式对 1997~1998 的 ENSO 事件进行了数值模拟并对 1998 年 1 月~1999 年 12 月的  $N_{ino3}$  指数作了预测, 同化结束后的模拟结果和预测结果与观测比较接近, 在 Z-C 简单海气耦合模式中使用四维变分同化技术能提高模式的模拟和预测能力。

ENSO 的发生、发展及消亡是一个复杂的过程, 不同时期的 ENSO 现象还具有不同的特征, 本文建立的四维变分同化 ENSO 预测模式仅对 1997~1998 年的 ENSO 过程进行了模拟和预测, 还有局限性。该预测模式的性能还有待进一步检验。这是以后完善本研究的一个重要方面。

## 参考文献

- 1 Bjerknæs J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Wea Rev*, 1969, 97, 163- 172
- 2 Horel D. J. et al. Planetary - scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation. *Mon Wea Rev*, 1981, 109, 813- 829
- 3 Cane M A, Zebiak S E, et al. Experimental forecast of El Niño. *Nature*, 1986, 321, 827- 832
- 4 Kleeman R, Moore A M, et al. Assimilation of subsurface thermal data into a simple ocean model for the initialization of an intermediate tropical coupled ocean- atmosphere forecast model. *Mon Wea Rev*, 1995, 123, 3103- 3113
- 5 Dake Chen, et al. Initialization and predictability of a coupled ENSO forecast model. *Mon Wea Rev*, 1997, 125, 773- 788
- 6 Sasaki Y. Some basic formalisms in numerical variational analysis. *Mon Wea Rev*, 1970, 89, 875- 883
- 7 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. *中国科学*, 1974, 6, 635 ~ 644
- 8 Lewis J M, Derber J C. The use of adjoint equations to solve a variational adjustment problem with advective constraint. *Tellus*, 1985, 37A, 97- 100
- 9 Le Dimet F X, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects. *Tellus*, 1986, 38A, 97- 100
- 10 Thacker W C, Long R. Fitting dynamics to data. *J Geophys Res*, 1988, 93, 10655- 10665,
- 11 Talagrand O, Courtier P. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation I: Theory. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1987, 113, 1311- 1328

# APPLICATION OF THE FOUR-DIMENSIONAL VARIATIONAL DATA ASSIMILATION TECHNIQUE ON OPTIMIZING THE INITIAL CONDITIONS OF Z-C MODEL

Duan Yihong   Liang Xudong   Li Yongping

(*Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030*)

Wang Dongxiao

(*South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301*)

## Abstract

The four-dimensional variational data assimilation (4DVAR) technique is applied in the Zebiak-Cane ENSO forecasting model for optimizing its initial conditions by using the adjoint method. The performance of adjoint model is checked via an ideal experiment. It suggests that ENSO forecasting model based on the adjoint model of 4DVAR technique has an ability of assimilating the observed sea surface temperature data. Comparing to the observational Nino3 Index, the simulated and forecasted one produced using the present model generally agree with that of observational during the period of 1997- 1999. This suggests that Zebiak-Cane ENSO forecasting model has been improved by using the 4DVAR technique.

**Key Words:** Zebiak-Cane model , Four-dimensional variational data assimilation, ENSO prediction