

改进 Zebiak-Cane 耦合模式的空间场结构

钱维宏 李立 王绍武

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘要 针对 Zebiak-Cane 耦合模式的模拟风场与观测存在的明显差异, 本文用引进 Hadley 环流异常改进的 Zebiak-Cane 模式作了 ENSO 循环的模拟, 发现改进的模式不但风场的模拟更接近于观测, 而且 1992~1993 年的海温异常预报也与观测一致。

关键词 海气耦合模式 Hadley环流 风场

1 引言

海气耦合的 Zebiak-Cane 模式 (ZC 模式)^[1]被认为是具有较好预报技巧的动力学模式^[2]。ZC 模式成功地预报了 1986/1987 及 1991/1992 年的 El Niño 事件。但是这一模式也与其他动力学及统计学模式一样, 对 1993~1995 年的两次弱 El Niño 事件提前 6 个月的预报位相刚好相反。近年来, 人们正试图作简单海气耦合模式的改进。Kleeman^[3,4]对一个类似 ZC 模式的简化耦合模式从大气对流和海洋动力学等方面作了改进。Chen 和 Zebiak 等^[5]改进了 ZC 模式的初始化系统, 发现改进的模式增加了预报技巧和减小了春季预报障碍。从预报结果看, 预报技巧的增加仅仅在 1972~1991 年, 而对近年来的两次短期增温 (1993 年和 1994 年末) 事件并没有预报出来^[5]。由于很多模式的预报失败发生在近几年, CLIVAR 计划^[2]指出目前模式提前 6 个月预报 ENSO 事件还存在着困难。于是, 这一计划提出未来 15 年的目标是加深对海气耦合系统可预报性极限以及产生这种极限原因的认识。

从现有发表的对 ZC 模式的改进方法来看, 几乎都是对初始场的改进。然而, ZC 模式中存在着当赤道东太平洋海温为正距平时东太平洋东风异常的不真实反映^[1]。模式大气风场的不真实反映必然会影响到模式的预报结果, 这也许是模式中还缺少一些物理过程的原因。从物理过程上对 ZC 模式进行分析和改进的工作目前报道得尚不多。我们对 ZC 模式的动力学过程作了分析, 发现它是一个局地海气耦合的模式, 而观测到的 ENSO 循环过程应该是多种尺度海气耦合的结果。于是, 我们提出了一个与其他改进不同的方案, 这就是在局地海气耦合的 ZC 模式中引进行星尺度的海气相互作用, 从而发展了一个包含 Hadley 环流异常对 ENSO 循环作用的海气耦合模式^[6]。改进后的模式克服了 ZC 模式大气风场与观测的不一致, 也使预报结果得到了明显的提高。本文主要

1996-11-27 收到, 1997-02-06 收到修改稿

• “九五”攀登预选项目

给出改进模式和 ZC 模式与观测风场的对比。

2 Zebiak-Cane 耦合模式中的负反馈

ZC 模式的负反馈机制是什么^[1]? 为什么模式大气的异常风场与观测的风场在东太平洋存在如此大的不一致? 为了回答这些问题, 我们分别对 ZC 模式的大气方程作纬向平均, 最后得到模式平均纬向西风与纬向平均加热异常的一个关系式

$$\bar{U} = \frac{\beta_0 y}{\varepsilon^2 + (\beta_0 y)^2} \left[\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \bar{Q}}{\partial y} + C_a^2 \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \right],$$

这里, $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ 分别为模式纬向和经向风的纬带平均; $Q = Q_s + Q_l$ 为感热和潜热加热; ε 为摩擦系数; 其他符号与 ZC 模式中的相同。可见, 在赤道上纬带平均风为零。我们讨论海温异常为最大正距平 $\Delta T > 0$ 的情况。一般有 $Q \propto \Delta T$, 此时在赤道两侧 $\partial \bar{Q} / \partial y < 0$, 于是赤道外纬带平均风为东风, 也就是赤道外异常的东风将得到发展, 这与 ZC 模式的模拟结果一致。可见, ZC 模式中暖中心的形成也就形成了东风的发展, 东风发展自然会导致洋盆东岸和赤道上涌流的形成, 构成一种负反馈机制。

3 多尺度海气耦合与 ZC 模式的改进

文献[6]认为 ENSO 事件是多尺度海气相互作用的结果, 这些尺度反映在大气中主要包括行星尺度的 Hadley 环流异常, 洋盆尺度的 Walker 环流异常和局地海气耦合的大气环流异常。只有一层大气的 ZC 模式不能描述行星尺度的 Hadley 环流异常和洋盆尺度的 Walker 环流异常。于是, 我们根据观测资料分析得到的赤道海温异常与赤道纬圈对流层大气平均西风异常的位相差关系^[7], 用参数化方法在 ZC 模式中引进了 Hadley 环流异常的改进^[6]。

ZC 模式的失败始于 1992 年, 在比较改进模式与 ZC 模式风场上的差别之前, 我们给出用 1992 年 1 月份的海温异常作为初始场, 分别代入 ZC 模式和改进模式预报 24 个月 NINO 3 区 ($5^\circ\text{N} \sim 5^\circ\text{S}$, $150^\circ \sim 90^\circ\text{W}$) 和 NINO C 区 ($0^\circ \sim 10^\circ\text{S}$, $180^\circ \sim 90^\circ\text{W}$) 海温异常的结果和与观测海温异常的对比 (图 1)。比较图 1 中两个模式的预报结果可

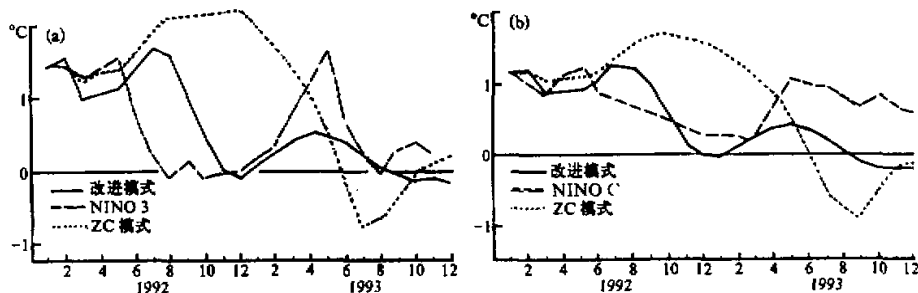


图 1 ZC 模式和改进的模式用 1992 年 1 月海温异常作初始场模拟的 NINO 3 区 (a) 和 NINO C 区 (b) 海温异常与观测 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

见, ZC 模式在 1992 年底海温距平值迟迟不下降, 这是 ZC 模式的标准参数决定了的, 而改进的模式在 1992 年海温距平降到平均值附近, 1993 年初再次增暖。这一改进表明, 行星尺度 Hadley 环流的加入相当于增加了一个 ENSO 循环的负反馈效应, 使改进的模式能适应气候系统中振荡频率加快的变化。

4 ZC 模式与改进模式在大气风场上的区别和与观测的对比

我们分别给出了 ZC 模式和改进模式中赤道东太平洋海温异常不同发展位相对应模式的大气风场分布如图 2 和图 3 所示。图 2 和图 3 中 NINO C SSTa 后面的数值标明对应图上 NINO C 区海温异常的平均值。图 2 中给出了 ZC 模式模拟的一次 ENSO 循环的过程, 即从一个非 El Niño 事件出发, 经过 El Niño 事件的发展过程和其消亡过程, 以及后来 La Niña 事件的形成过程。我们集中分析 ZC 模式中 ENSO 循环不同位相中模式风场的分布特征。图 2 中无论在 ENSO 循环的哪一个位相, 沿赤道的纬向风平均为零, 但在 El Niño 事件进入成熟位相的时候, 模式赤道外东风明显大于西风。随着异常东风的发展, 赤道东太平洋首先出现了负的海温距平。相反地, 在负海温距平位相, 即 La Niña 位相, 模式赤道外为西风距平。所以, 赤道东太平洋负海温距平的出现, 又为下一次 El Niño 事件的出现创造了条件。ZC 模式模拟的海温异常始终在固定的位置上发展, 这与观测到的暖中心从东太平洋沿岸向西发展或在中太平洋暖中心开始向东发展和传播不一致。一个可能的原因是 ZC 模式的固定边界条件和无模式外强迫的结果。对 ZC 模式引进 Hadley 环流异常的改进后, 计算的 ENSO 循环各个海温异常位相的模式大气风场见图 3 所示。比较 ZC 模式与改进模式的结果发现, 模拟的海温异常除频率不同外海温异常的地理分布也有所相同, 改进模式模拟的海温异常中心是一边增强, 一边向东发展的。此外, 它们最大的差别在改进模式中海温异常最大时东太平洋没有出现比观测值大的东风。

模式风场是否得到了改进, 我们可以比较模式结果与资料分析的结果。图 4 和图 5^[8]是对 1957、1965 和 1972 年 3 次 El Niño 事件发展过程中风场和温度场所作的合成分析和对 1982、1986 和 1991 年 3 次 El Niño 事件所作的合成分析。由于 El Niño 事件发生的年代际背景场不同, 所以 1977 年前后 El Niño 事件的发展过程存在着明显的差异。这里, 我们主要综合分析合成结果中不同海温异常下对应的风场分布。图 4 为合成分析的 1956、1964 和 1971 年 11 月与 12 月的海温场和风场。赤道中东太平洋为负的海温异常, 对应的风场在负海温区是辐散的。这个位相的海温异常和风场的分布与改进模式模拟图 3 中 NINO C SSTa = -1.12°C 的海温异常和风场的分布一致。两图中, 沿赤道中西太平洋有东风分量, 东太平洋有西风分量; 赤道两侧 (15°N、15°S) 附近存在相同的西风分量和向极的分量。El Niño 事件的发展过程中, 如合成分析的 1981、1985 和 1990 年 11 月与 12 月的结果, 1982、1986 和 1991 年 3 月与 4 月的结果 (图 5), 它们的风场分布与改进模式 (图 3) 中 NINO C SSTa = 0.85°C 的风场分布基本一致, 表现出异常风向暖中心辐合。我们最关注的是 El Niño 事件成熟位相时的风场分布, 尽管 1977 年前后 El Niño 事件发展的中间过程有所不同, 但 El Niño 事件成熟时风场的分布是基本相同的。比较 El Niño 事件成熟时风场的分布 (图 4 和图 5) 与两个模式模拟

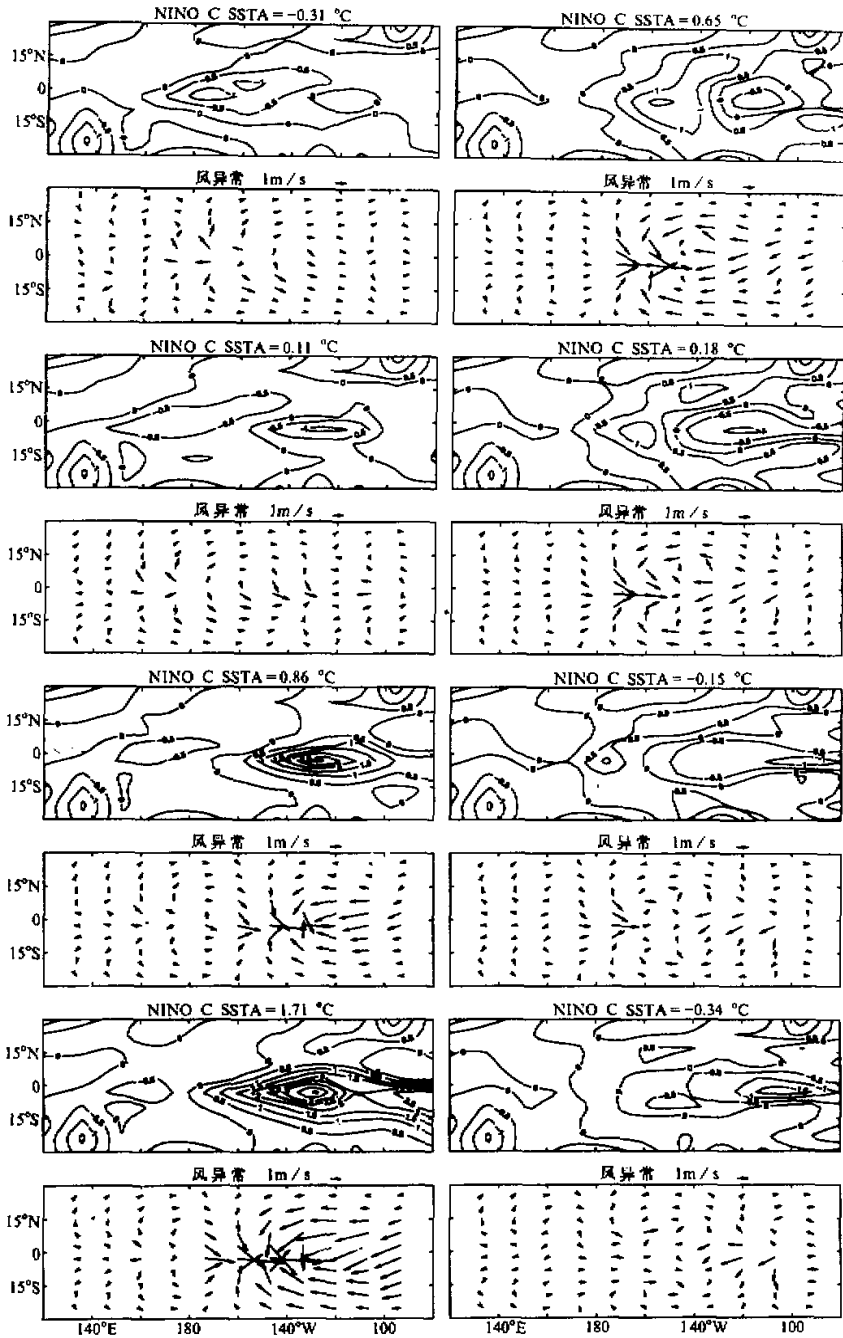


图 2 ZC 模式计算的 ENSO 不同发展位相上的模式海温异常 ($^{\circ}\text{C}$) 和大气风异常分布

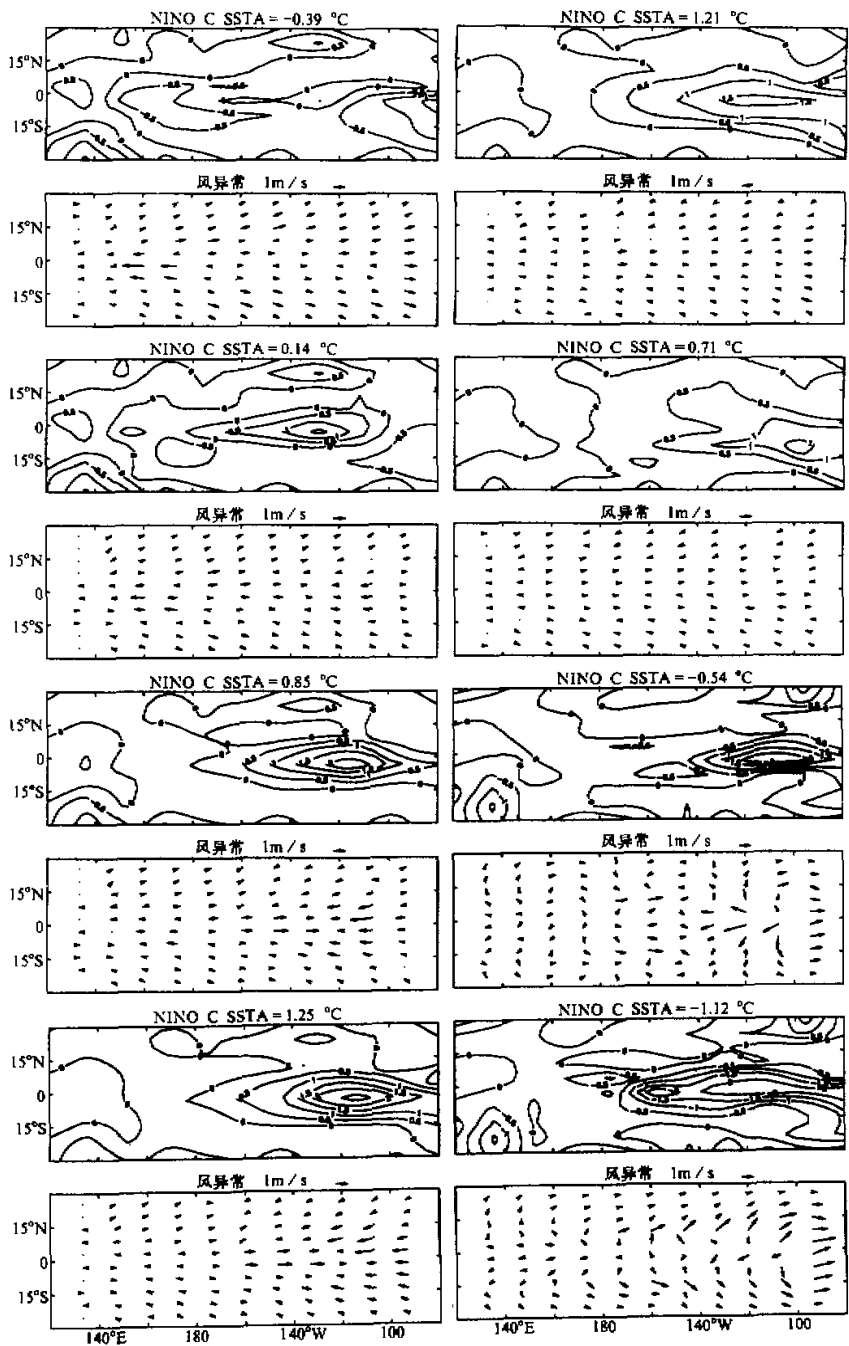


图 3 改进模式计算的 ENSO 不同发展位相上的模式海温异常 (°C) 和大气风异常分布

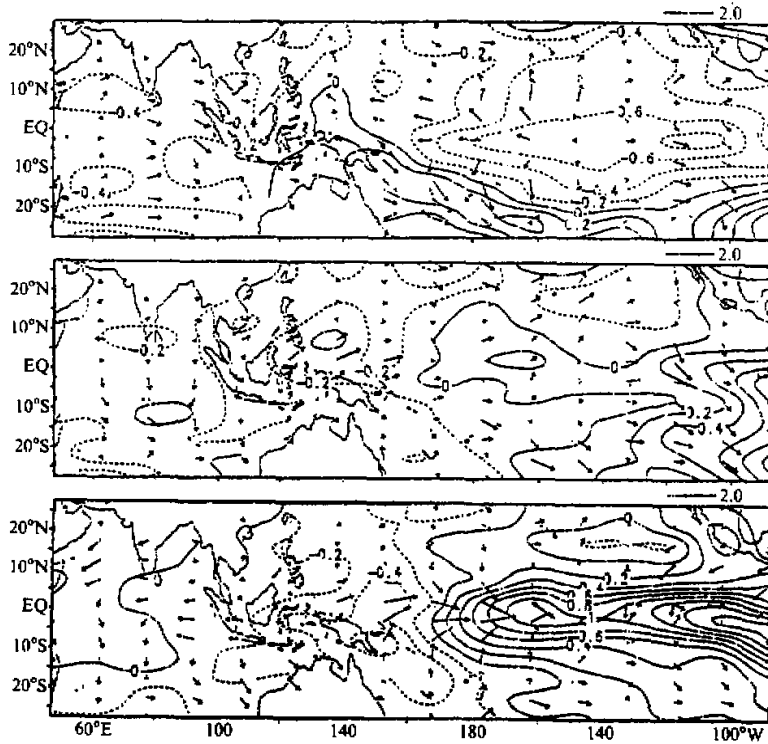


图 4 合成分析的 1957、1965 和 1972 年 El Niño 事件开始位相、发展位相和转换位相的月平均海温异常 ($^{\circ}\text{C}$) 和风异常^[8]

El Niño 事件成熟时风场的分布发现, ZC 模式中中东太平洋的风不是真实的, 而改进模式的风场分布与观测结果较为一致。

5 结果与讨论

本文重点对改进模式的大气风场作了与 ZC 模式和资料合成的对比分析, 结果能帮助说明对 ZC 模式的改进除了从初始场上考虑外, 模式内部动力学问题也必须考虑, 而后者关系到 ENSO 循环的机制问题。

当前 ENSO 预报的动力学模式和统计模式不能适应 90 年代气候系统中海气相互作用频率加快的变化和各種改进模式预报结果的多样性及模式空间场与观测的不一致性, 说明改进模式还有很大的潜力。

ZC 模式是一个局地海气相互作用的耦合动力学模式, 理论上源于模式洋盆中西部的扰动可以通过局地海气相互作用沿赤道向东发展, 形成一次 ENSO 事件。但是, ZC 模式中的暖中心几乎是在原地增强和沿赤道向两侧发展的。ZC 模式的负反馈机制是赤道带海温异常升高时产生的赤道外平均东风的发展。

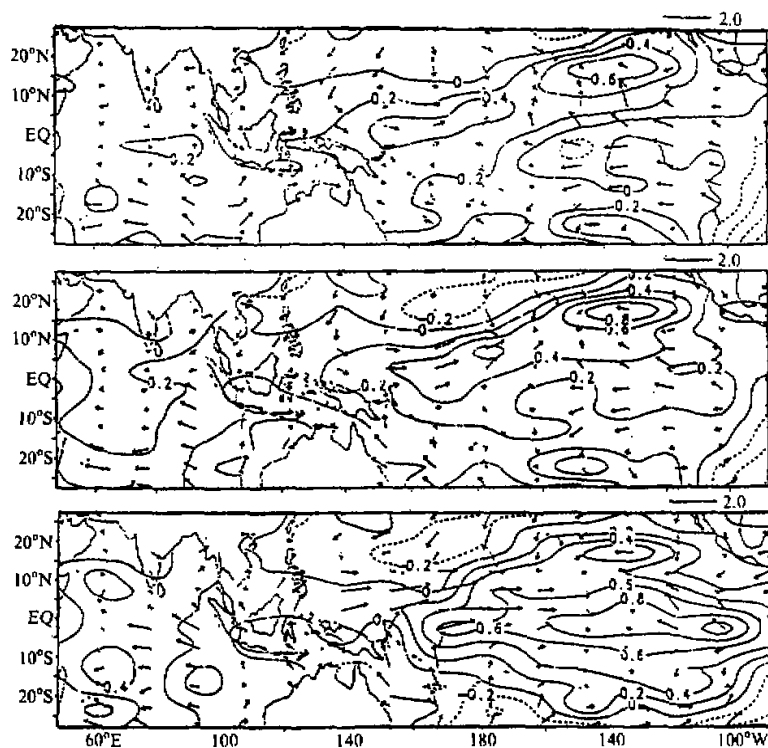


图5 合成分析的1982、1986和1991年El Niño事件开始位相、发展位相和转换位相的月平均海温异常(°C)和风异常^[8]

对 ZC 模式引进 Hadley 环流异常的改进, 较好的预报出了 1992~1993 年的海温异常事件。改进模式模拟的海温异常的发展更接近 80 年代以来 El Niño 事件形成前暖中心由中太平洋向东发展的过程。包含 Hadley 环流异常的改进后, ENSO 循环的负反馈机制中就有了行星尺度海气耦合的正负反馈过程。于是, 改进模式的大气风场更接近于观测。

参 考 文 献

- 1 Zebiak, S. E. and M. A. Cane, 1987, A model El Niño-Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 2262~2278.
- 2 CLIVAR, 1995, A study of climate variability and predictability science plan, WCRP-89 WMO/TD No. 690.
- 3 Kleeman, R., 1991, A simple model of the atmospheric response to ENSO sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 3~18.
- 4 Kleeman, R., 1993, On the dependence of hindcast skill on ocean thermodynamics in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Climate*, **6**, 2012~2033.
- 5 Chen, D., Zebiak S. E., Busalacchi A. J. and Cane M. A., 1995, An improved procedure for El Niño forecasting: implications for predictability, *Science*, **269**, 1699~1702.
- 6 钱维宏、王绍武, 1997, 多时空尺度海气相互作用与 Zebiak-Cane 模式的改进, *中国科学 (D)*, **27**(6), 554~559.

- 7 钱维宏、丑纪范, 1996, 地气角动量交换与ENSO循环, 中国科学 (D), 26(1), 80~86.
8 Wang, B., 1995, Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades, *J. Climate*, 8, 267~285.

An Improved Zebiak-Cane Model for Simulating the Spatial Structure of Wind Field

Qian Weihong, Li Li and Wang Shaowu

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Comparing the discrepancy between wind anomalies in Zebiak-Cane model and observation, it is found that the model only simulated local air-sea interaction. By introducing Hadley circulation anomaly into Zebiak-Cane model, however, the model results have obviously gotten improvement not only on wind anomaly but also on prediction of the equatorial eastern Pacific sea surface temperature anomaly during 1992~1993.

Key words coupled atmosphere-ocean model Hadley cell wind field

编辑部启事

1. 编辑部的电话已改为 6205 0179 和 6200 7562, 原来的 64919944 转 2481 和 2491 均已作废。
2. 为便于同读者、作者联系, 编辑部已开设电子函件 (E-mail) 信箱 daqi@public.east.cn.net。
3. 作者投稿时除应注明工作单位、通讯地址和邮政编码之外, 还请留下电话号码以及电子函件 (E-mail) 地址, 以便于联系。
4. 凡使用计算机打印稿件的作者, 在交寄最后审定的修改稿时, 务必附上有对应文件的软磁盘, 除注明使用的是何种文字处理软件外, 最好带有文本格式 (.txt) 的对应文件。软磁盘一般不退。

《大气科学》编辑部

1998 年 4 月