

# 混合海气耦合模式的研制和 El Niño 的 预告试验\*

倪允琪

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

*S. E. Zebiak*      *M. A. Cane*

(Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, N.Y. 10964)

*L. Marx*      *J. Shukla*

(Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, Calverton, MD 20705-2425)

**摘要** 所使用的海气耦合模式是由 COLA R15 AGCM 和简单的 CZ 海洋模式耦合而成。使用该混合海气耦合模式完成了 15 次 ENSO 试验预报, 预告和观测的 Niño 3 指数超前 15 个月的相关系数达 0.6 (在 0.01 有意义水平上该相关系数在统计上是有意义的), 超前一年半的 Niño 3 指数的预告误差大约为 0.6~0.9 °C。预告结果表明混合海气耦合模式具有预测 ENSO 的能力达 15 个月。最后, 还讨论了该模式的优点和进一步改进的途径。

**关键词** 混合海气耦合模式 预告试验 El Niño

## 1 引论

时间尺度为几个月到几年的最重要的短期气候信号是 El Niño / 南方涛动现象 (ENSO)。由于 ENSO 不但影响区域和全球气候, 而且对热带太平洋的生态环境和许多国家的经济都有明显的影响, 从而引起广泛的重视<sup>[1~4]</sup>。因此, 了解和预测 ENSO 过程是相当有趣和引人注目的研究工作, 在这方面已经取得有意义的进展<sup>[5,6]</sup>。

由于 ENSO 是热带海洋和大气强烈耦合的结果, 因此, ENSO 最成功的预测只有使用海气耦合模式才能取得。至今已有三种不同的动力耦合模式用于 ENSO 研究和预告: 一种是 AGCM 和 OGCM 的耦合, 称为耦合 GCM<sup>[7~9]</sup>; 第二种是简单的大气模式和 OGCM 耦合, 称为混合海气耦合模式<sup>[10]</sup>; 第三种是简单的海洋模式和简单的大气模式耦合, 称为简单的海气耦合模式<sup>[11]</sup>。然而, 预告试验并没表明耦合的 GCM 的结果要比简单的 CZ 模式要好<sup>[8]</sup>, 在耦合的 GCM 模式中最基本的困难之一是气候漂移, 即模式气候逐渐远离观测的气候状态。为了要改进耦合 GCM 的结果和阻止气候漂移, 使用和观测气候状态有关的通量订正法或在耦合 GCM 中用观测气候代替模式气候。虽然这些修正方法并没有足够的物理基础, 但是我们仍然假设这些订正仅仅对改进

1997-01-20 收到, 1997-04-10 收到修改稿

\* 本文的研究得到国家自然科学基金的支持

气候态起作用,而对气候动力性质没有严重的影响。事实上,这很难做到,因为它的确会影响最终的结果,尤其在模式气候有很大误差而它的变率又弱时更会如此<sup>[8,12,13]</sup>。然而,由于简单耦合模式是距平模式,因此几乎不存在任何气候漂移的问题。但是,预告 ENSO 的目的不仅是为了预测海气相关作用,而且是为了预测 ENSO 对全球变化的影响,因此,我们希望发展一个耦合模式,它既没有气候漂移,又能预测 ENSO 及其对全球气候的影响,这种耦合模式可以由全球大气环流模式(COLA R15 AGCM)和简单海洋模式(Cane-Zebiak 海洋模式)耦合组成,我们用这一混合海气耦合模式做了 15 次 1979~1991 年期间的 El Niño 和 La Niña 及其对全球气候影响的预测。试验结果表明混合海气耦合模式的预告能力令人鼓舞。

本文第二节介绍了 COLA R15 AGCM 和 CZ 海洋模式的结构;在第三节中,叙述了耦合方案和初始条件;在第四节中我们对风应力和 SSTa 的预告结果进行了统计分析,第五节详细地讨论了 1981~1983 年的预告个例;最后一节总结和讨论了混合海气耦合模式及其试验结果。

## 2 COLA R15 AGCM 和简单 CZ 海洋模式的结构简介

混合海气耦合模式的大气分量使用的是在美国 NMC 全球谱模式基础上发展起来的 AGCM,该模式的方案、初值和边界条件已在 Sela<sup>[14]</sup>和 Kinter 等<sup>[15]</sup>的文章中详细介绍。模式方程由原始运动方程和水汽混合比的预测方程组成,速度的垂直分量的方程由静力平衡假设的诊断关系来替代,在垂直方向有 18 层,采用  $\sigma$  坐标,水平分辨是菱形截断、截断波数为 15,时间积分采用半隐式格式。

该模式的物理过程包括太阳辐射的吸收和长波辐射传输计算的参数化,基于 Monin-Obukhov 混合长理论的边界层动量及其通量的参数化、重力波拖的参数化、描述地表热量平衡的三层土壤温度公式和描写土壤湿度的地面水份平衡。一种相互作用的方案和简化的简单陆面过程也耦合进该 AGCM。另对,还考虑了动量、热量和水汽扩散(水平和垂直方向)。

模式的初值化方案采用二次迭代、非线性正规模式方案,在模式中使用的边界条件是资料库提供的气候的、并随季节变化的地球表面条件和根据季节平均值给出的臭氧混合化。

Zebiak<sup>[16]</sup>已经详细介绍了简单 CZ 海洋模式,本文仅作简要的介绍。

模式的动力学框架起始于线性约化重力模式,该模式仅仅计算出厚度平均的斜压海流,而表面海流由摩擦(Ekman)分量来决定。因此,定常厚度(50 m)的浅薄摩擦层附加到实际存在风生流的表面层,这一层的动力学依然保持线性,但是使用瑞利(Rayleigh)摩擦表示赤道地区的非线性影响。在这模式中,表面层的压力梯度仅随斜温层、厚度而变化,但略去了发生在表面层中的任何温度变化的影响。

在表面层中描述温度距平演变的热力学方程包含有三维的温度平流,其中包括给定的平均流和计算的距平流的作用,并假定表面热通量距平和局地 SST 距平成正比,而且它的作用总是把温度场朝向它的气候平均状态调整,模式中的气候平均态根据观测值给定。

COLA R15 AGCM 在全球范围内积分, 时间步长为 0.5 h。简单海洋模式积分范围为  $124^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{W}$  和  $29^{\circ}\text{S} \sim 29^{\circ}\text{N}$ , 时间步长为 10 天。

### 3 耦合方案和初值条件

对于海洋来讲, 我们仍然采用上节叙述的表面热通量距平和局地 SST 平成正比的假定, 由 AGCM 给出的表面风应力距平驱动海洋, 风应力距平是由 AGCM 模式积分的 10 天平均风应力减去模式旬平均气候值 (用 1979~1991 年的观测海温强迫大气模式积分 13 年, 把其多年逐旬 (10 天) 平均值作为模式旬平均气候值) 得到, 由 CZ 海洋模式提供的海表温度距平加上观测的 SST 气候值作为 AGCM 的下边界条件。

大气初值由观测海表温度强迫 AGCM 积分得到, 海洋初值由观测的风计算得到的风应力驱动 CZ 海洋模式得到。每隔 10 天, AGCM 和 CZ 海洋模式耦合一次, 这样的耦合过程一直到耦合模式积分了两年为止。很明显, 在我们的耦合模式中没有使用任何和观测到的气候态或任何其他观测资料有关的订正。我们已经分析了用 COLA R15 AGCM 模拟的 13 年的风应力距平和 FSU 观测的风应力距平的比较结果 (FSU 资料是假风应力, 因此, 它必须乘上  $\rho C_d = 0.02$ ), 我们发现 COLA R15 AGCM 模拟和风应力距平比 FSU 观测的假风应力距平乘上 0.02 的结果要弱, 而且辐合带位于观测位置的南面 4 或 5 个纬度<sup>[17]</sup>。因此, 在耦合模式中强迫简单海洋模式的风应力距平是 AGCM 风应力距平的 1.5 倍。

用观测的 SST 强迫 COLA R15 AGCM 已经运行了 13 年, 从 1979 年 1 月到 1991 年 12 月, 我们可以从这 13 年的结果中任意选择作为耦合模式大气分量的初值。类似的做法, 也就是起始于 1964 年 1 月 FSU 用观测的风应力距平驱动 CZ 海洋模式得到的结果作为简单海洋模式的初值。

使用上述混合海气耦合模式和上述的海洋、大气分量的初值完成了 15 次试验性的预报, 其中 12 次起始于 1979~1991 年的 11 月 1 日 (1985 年除外) 和另外三次起始于 1985、1987 和 1990 年的 8 月 1 日, 每一次预报都积分两年。

### 4 混合海气耦合的预报试验结果

#### 4.1 海洋分量

Niño 3 指数表示热带太平洋海表温度变率的基本特征, 使用 CZ 模式所作的业务预告也用这个指数作为预报指标。Niño 3 指数定义为  $150^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$  和  $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$  区域平均的海表温度。混合海气耦合模式预告的 Niño 3 和观测的 Niño 3 的超前相关系数在图 1 中给出, 该图表明超前 15 个月的相关系数达 0.6 以上 (相关

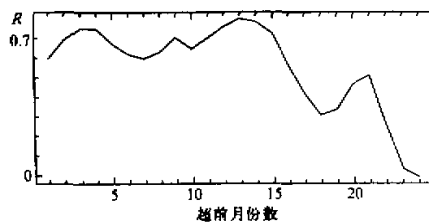


图 1 混合海气耦合模式预告和观测的 Niño 3 指数的超前相关  
横座标为超前月份, 纵座标为相关系数

系数大于 0.6 即为在统计上是显著的, 其显著性水平为 0.01), 该相关曲线表明有两个峰值: 一个峰值位于超前 3~4 个月, 第二个峰值位于超前 12~15 个月, 超前 21 个月时相关系数减小但仍然接近 0.6。

为了进一步验证混合海气耦合模式的上述结果的可靠程度, 我们比较了模式预报的 Niño 3 和同期观测的 Niño 3 指数, 图 2a、b、c 和 d 分别给出了超前 6、12、15 和 18 个月的预报和观测的 Niño 3 指数, 这些结果清楚地表明预报的 Niño 3 通常比观测值弱, 预报的 Niño 3 的位相变化在超前 18 个月前和观测结果比较一致。而且 1982~1983、1986~1987、1992~1993 年的暖事件和 1988~1989 年的冷事件基本上预报出来了。

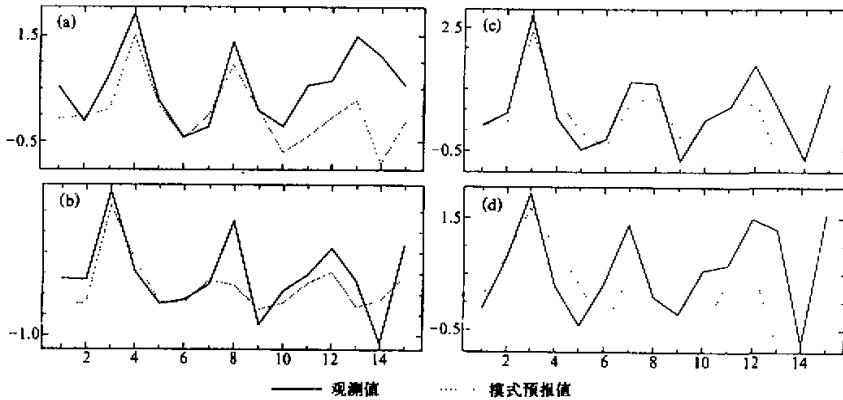


图 2 模式预报的和观测的 Niño 3 指数。实线为观测值, 虚线为模式预告值  
(a) 超前 6 个月; (b) 超前 12 个月; (c) 超前 15 个月; (d) 超前 18 个月

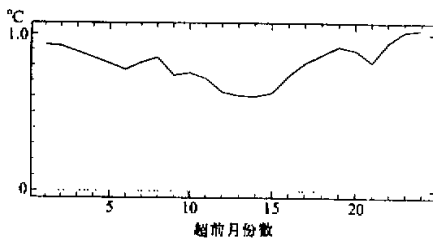


图 3 混合海气耦合模式预报的 Niño 3 指数的均方根误差  
横座标为超前月份数, 纵座标为 °C

为了较好地估计作为预告超前时间函数的模式结果和误差增长, 计算了每一个超前月份的混合海气模式预告和观测的 Niño 3 指数之间的均方根差值, 并在图 3 中给出。图 3 表明, 混合海气耦合模式的均方根差值在超前 15 个月前是减小的, 然后再递增。值得注意的是最小误差出现在超前 12~15 个月。考虑到图 1 和图 3 的结果, 混合海气耦合模式最好的预告结果出现在超前 5~6 个月和 12~15 个月。

为了进一步反映混合海气耦合模式海洋分量的预告能力, 我们计算了每一个格点预告的 SSTa 和观测值超前 6、12、15 和 18 个月的相关系数以及相应时段的持续性预告和观测值之间的相关系数, 结果表明在超前 6 个月时 (图略), 前者相关系数大于 0.6 的区域仅仅位于热带东太平洋, 而后者相关系数大于 0.6 的区域几乎复盖了热带中、东太平洋整个地区。然而, 超前 12 个月时, 模式预告和观测的 SSTa 的相关系数大于 0.6 的区域已向西扩展到日期变更线附近, 而持续性预告在超前 12 个月后就丧失了所有

的预告能力 (见图 4c 和 d)。特别要注意的是在混合海气模式中, 相关系数大于 0.6 已扩展到日期变更线附近的区域一直维持到超前 15 个月 (见图 4a 和 b), 而超前 18 个月时, 该区域又退缩到热带东太平洋 (图略)。结果似乎还表明超前 6 和 18 个月时热带西太平洋地区几乎不存在任何预告能力, 而在超前 12~15 个月时该区域沿赤道的相关系数是正的 (但统计上不显著)。

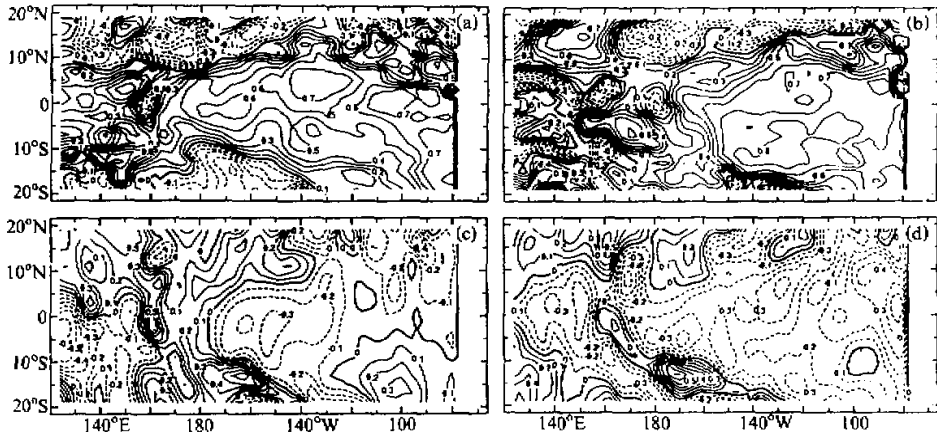


图 4 模式预告的和观测的 SSTA 之间的超前相关, (a) 超前 12 个月; (b) 超前 15 个月; 持续性预告和预测的 SSTA 之间的超前相关, (c) 超前 12 个月; (d) 超前 15 个月

## 4.2 大气分量

耦合模式的预告能力不仅和海洋分量有关, 而且和大气分量有关系。然而, AGCM 预告的风应力包含了许多高频噪声, 因而用 AGCM 长时间的正确预告风应力比海洋分量的预告要困难, 其原因是后者基本上只包含低频分量。我们计算了超前 6、12、15 和 18 个月的预告和观测海表风应力距平的纬向分量的相关系数以及相应时段的持续预告和观测值之间的相关系数 (见图 5a、b、c 和 d)。首先, 我们发现在上述两个结果中超过 0.6 的相关区比海洋分量要小, 这就清楚表明用 AGCM 预告风应力距平的困难性, 在超前 6 个月时, 后者超过 0.6 的区域只有赤道中太平洋较小的区域, 而前者超过 0.6 的区域要比后者大 (图略)。在超前 6 个月后, 持续性预报已经失去预告能力 (图 5 略)。有趣的是模式预告和观测的风应力距平的纬向分量之间的正相关区仅仅位于日期变更线到 120~140°W 的热带中太平洋地区, 但其统计上显著区也比海洋分量要小, 而且位于赤道南面一点, 这结果是由于 COLA R15 AGCM 的缺点<sup>[17]</sup>造成的, 显然, 位于热带中太平洋上的这一统计显著区一直维持到超前 15 个月 (见图 5a)。

## 5 1982~1983 年暖事件的预报个例研究

1982~1983 年暖事件是近几十年来最强的暖事件, 由于这次事件引起全球气候的激烈变化而特别引起人们的注意。图 6 给出了初始时刻分别为 1980、1981、1982

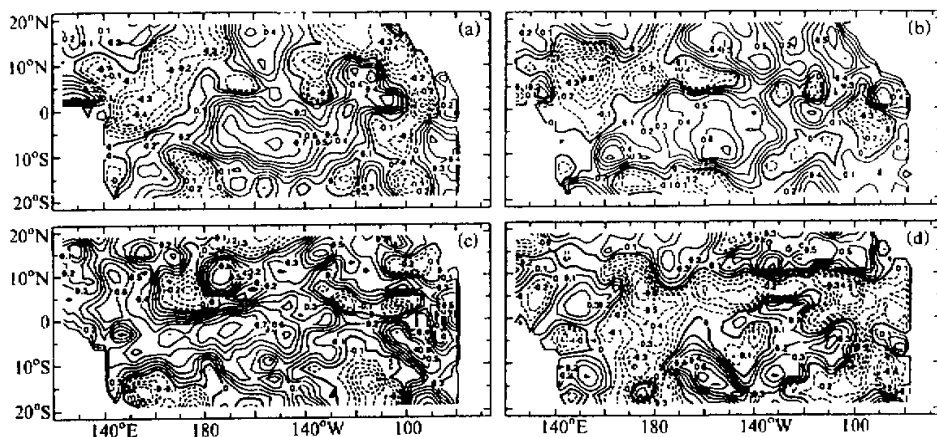


图 5 模式预告的和观测的风应力距平纬向分量之间的超前相关, (a) 超前 12 个月; (b) 超前 15 个月; 持续性预告和观测的风应力距平纬向分量之间的超前相关; (c) 超前 12 个月; (d) 超前 15 个月。

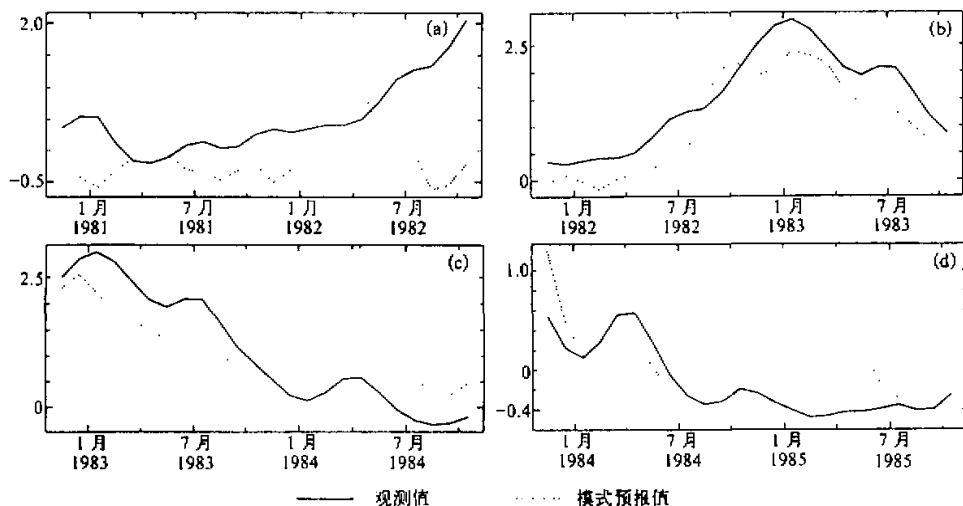


图 6 混合海气耦合模式预告的和观测的 Niño 3 指数

(a) 1980~1982 年; (b) 1981~1983 年; (c) 1982~1984 年; (d) 1983~1985 年  
实线为观测值, 虚线为预报值

和 1983 年 11 月 1 日的预告的 Niño 3 指数, 而每次预告都做了两年。这些结果表明起始于 1981 年 11 月的 1981~1983 年的预告和起始于 1982 年 11 月的 1982~1984 年的预告尤为成功, 模式几乎能预告两年的 Niño 3 指数的变化。图 7 表示预告和观测的 1981~1983 年个例的 SSTa 沿赤道的时间经度剖面图。由图 7 看到沿赤道剖面预告的 SSTa 抓住了观测场的主要特征以及最大的 SSTa 出现的时间和地点都正确地预告出来了, 虽然它的强度预告稍弱一点。然而, 该混合海气耦合模式也存在明显的缺点, 观测

结果(见图 7b)表明正的 SSTA 区域由日期变更线的东侧逐渐向东传播, 而且在热带东太平洋加强, 但是, 预告结果(见图 7a)显示正的 SSTA 区是直接热带东太平洋形成和没有明显的自西向东的传播, 而且同样的缺点可以在预告的风应力距平中看到(图略)。

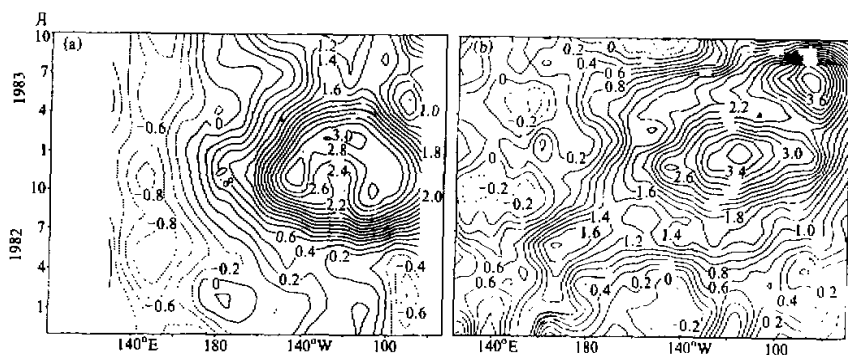


图 7 1982~1983 年暖事件沿赤道的 SSTA 时间-经度剖面图

(a) 预告; (b) 观测

## 6 讨论和总结

混合海气耦合模式是由全球大气环流模式——COLA R15 AGCM 和一个简单的海洋模式——CZ 海洋模式耦合而成, 它不同于一般由简单的大气模式和 OGCM 耦合组成的混合海气耦合模式, 这类混合耦合模式的好处不仅是能预告暖、冷事件的过程, 而且能预告与这些暖、冷事件有关的全球气候变化, 上述后一部分的工作我们将另文讨论和分析。本文的 15 次 ENSO 事件的试验性预告表明该混合海气耦合模式可以比较成功地预测热带中东太平洋的海表温度距平变化, 进一步发展这类模式用于气候预告将令人鼓舞。然而, 应该指出在本研究中仅有 15 个独立统计样本, 试验也表明预告结果也和模式运行时的初始月份有关, 这一点和 CZ 模式一致<sup>[1]</sup>, 因此, 我们在这里还不能对此做出肯定的结论。

比较混合海气耦合模式预告和观测的 Niño 3 指数和 SSTA 的超前相关与持续性预告和观测值的超前相关, 可以看到一直到超前 15 个月的超前相关在统计上仍然是有意义的, 最大相关系数分别出现在超前 5 个月和 15 个月, 这些结果清楚地指出该模式预告 Niño 3 指数和 SSTA 的演变过程的能力可以达到 15 个月, 预告误差的分析也表明最小误差出现在超前 12~15 个月和误差值为  $0.6^{\circ}\text{C}$  以及在超前一年半期间其最大误差振幅不超过  $0.9^{\circ}\text{C}$ , 自此以后误差增长很快。值得注意的是模式预告和观测的风应力距平的超前相关的统计检验以及和持续性相关比较指出风应力距平的纬向分量的显著区位于热带中东太平洋, 但是它支配了热带中东太平洋上的海表温度的异常变化, 这一模式基本上抓住了观测到的这一重要特征, 并使超前 15 个月以前的预告结果和观测结果比较一致。

上述试验清楚地表明和 CGCM 相比<sup>[8,9]</sup>这类混合海气耦合模式在不采用订正情况下气候漂移较弱。显然,混合海气耦合模式的海洋分量是一个由风应力距平驱动的简单的距平模式并直接预告海表温度距平,因而由该距平模式直接预告的 SSTA 加上观测的气候 SST 强迫 AGCM 避免了通常由海洋模式产生的气候漂移影响;在海气耦合过程中由 AGCM 提供的风应力距平又减弱了 AGCM 的气候漂移影响,AGCM 的风应力距平是由 AGCM 预告的风应力减去模式的气候风应力得到的。因此,在这种混合海气耦合系统中发生了海洋和大气之间距平分量的相互作用。另一方面,从理论上讲,这类模式不仅能预告 ENSO 而且能预告全球气候变化,而 CZ 耦合模式只能预告 ENSO,因此,就气候变化预告而言,这类耦合模式应该进一步得到发展。

致谢:我们非常感谢在美国COLA工作的朱正心先生对本研究的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Rasmusson, E. M. and T. H. Carpenter, 1982, Variation in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation / El Niño, *Mon. Wea. Rev.*, **10**, 354~384.
- 2 Barber, R. T. and F. P. Chavez, 1983, Biological consequences of El Niño, *Science*, **222**, 1203~1210.
- 3 Rasmusson, E. M. and J. M. Wallace, 1983, Meteorological respects of the El Niño / Southern Oscillation, *Science*, **22**, 1195~1202.
- 4 Glantz, M. H., R. W. Katz and N. Nicholls. (Eds.), 1991, Teleconnections linking worldwide climate anomalies. Cambridge University Press.
- 5 Graham, N. E., J. Michaelsen and T. P. Barnett, 1987, An investigation of the El Niño-Southern Oscillation cycle with statistical models. Part 1: Predictor field characteristics, *J. Geophys. Res.*, **92**, C13, 14251~14270.
- 6 Graham, N. E., J. Michaelsen and T. P. Barnett, 1987, An investigation of the El Niño-Southern Oscillation cycle with statistical models. Part 2: Model results, *J. Geophys. Res.*, **92**, C13, 14271~14289.
- 7 Miyakoda, K., A. Rosati, and R. Gudgel, 1992, Toward the GCM seasonal forecasts. CAS Group of Rapporteurs on Medium- and Long-range Weather Prediction Research, *Toulouse*, 10~14.
- 8 Latif, M., A. Sterl, E. Maier-Reimer and M. M. Junge, 1993, Climate variability in a coupled GCM. Part I: The tropical Pacific, *J. Climate*, **6**(1), 5~21.
- 9 Ji, M., A. Kumar and A. Leetmaa, 1994, An experimental coupled forecast system at the national meteorological center: some early results, *Tellus*, **64**(A), No. 4, 398~418.
- 10 Barnett, T. P., M. Latif, N. Graham, M. Flugel, S. Pazan and W. White, 1993, ENSO and ENSO-Related Predictability. Part I: Prediction of Equatorial Pacifics Sea Surface Temperatures with a Hybrid Coupled Ocean-atmosphere model, *J. Climate*, **6**(1), 5~21.
- 11 Cane, M. A., S. E. Zebiak and S. C. Dolan, 1986, Experimental forecasts of El Niño, *Nature*, **321**, 827~832.
- 12 Gordon, C., 1989, Tropical ocean-atmosphere interaction in a coupled model, *Philos. Trans. R. Soc., London, Ser. A*, **329**, 207~223.
- 13 Lau, N. C., S. G. H. Philander and M. J. Nath, 1992, Simulation of ENSO-like phenomena with a low-resolution coupled GCM of the global ocean and atmosphere, *J. Climate*, **5**, 284~307.
- 14 Sela, J. G., 1980, Spectral modeling at NMC, *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1279~1292.
- 15 Kinter, J. L., III, J. Shukla, L. Marx and E. K. Schneider, 1988, A simulation of the winter and summer circulation with the NMC global spectral model, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2486~2522.
- 16 Zebiak, S. E., 1984, Tropical atmosphere-ocean interaction and the El Niño / Southern Oscillation phenomenon. Ph. D. thesis. M. I. T., 261pp.

- 17 Ni, Y., D. M. Straus, S. E. Zebiak and M. A. Cane, 1996, Comparison of surface wind stress anomalies over the Tropical Pacific simulated by an AGCM and by a simple atmospheric model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 13(2), 229~243.

## Experimental El Niño Predictions with a Hybrid Coupled Ocean-Atmosphere Model

Ni Yunqi

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

S. E. Zebiak and M. A. Cane

(Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University Palisades, N. Y. 10964)

L. Marx and J. Shukla

(Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies Calverton, MD 20705-2425)

**Abstract** This study used coupled ocean-atmosphere model which consists of the COLA R15 AGCM and a simple CZ Ocean model. Fifteen experimental Predictions for ENSO are performed by this hybrid coupled model. The leading correlation of predicted and observed Niño 3 exceeds 0.6 (statistical significance at level 0.01) out to a 15 month lead time. The error of predicted Niño 3 is about 0.6~0.9 before leading one and a half years. Predicted results indicate that the hybrid coupled model may possess capability of ENSO prediction for 15 months. Finally, advantages and improvement approaches of this model are discussed.

**Key words** hybrid coupled ocean-atmosphere model experimental prediction El Niño