

异常东亚冬季风激发 ENSO 的 数值模拟研究*

李崇银 穆明权

(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 100080)

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所发展的热带太平洋环流模式 (OGCM) 和海-气耦合模式 (CGCM) 分别就冬半年东亚冬季风异常对赤道太平洋的作用进行了数值模拟研究。结果清楚地表明, 无论在 OGCM 中还是在 CGCM 中, 持续的冬季风强异常将引起赤道中东太平洋海表水温 (SST) 的明显正异常, 其分布类似观测到的 El Niño 事件; 而持续的冬季风弱异常将引起赤道中东太平洋 SST 的明显负异常, 其分布十分类似观测到的 La Niña 事件。因此, 数值模拟进一步证实了我们过去从资料诊断和理论分析中得到的结论, 即东亚冬季风异常是激发产生 ENSO 的重要机制。对模式资料的分析还清楚表明, 异常东亚冬季风将激发异常海洋 Kelvin 波和使热带大气季节内振荡出现强异常, 它们是激发 ENSO 的重要物理因素, 这与观测资料的分析结果相一致。

关键词 东亚冬季风 ENSO Kelvin波 热带大气季节内振荡

1 前言

厄尔尼诺/南方涛动 (ENSO) 以其对全球广大地区带来严重旱涝等灾害而受到全世界人们的关注, 一系列的研究表明, 它是热带大尺度海-气相互作用的产物, 包括 El Niño 和 La Niña, 但因为其复杂性目前尚不完全清楚它发生的机理。70 年代, 国际上提出了 El Niño 发生的信风张弛理论^[1], 80 年代又提出了 El Niño 的海气耦合波不稳定性理论^[2,3], 但是都未能很好地解释 El Niño 发生的物理机制, 尤其是对海-气相互作用系统中大气环流异常的作用考虑不够。早在 1988 年李崇银根据资料诊断和理论分析已指出 El Niño 事件发生的前期征兆在赤道西太平洋地区, 并提出东亚冬季风的持续强异常是激发 El Niño 的重要机制^[4,5]; 其后又进一步指出了 El Niño 与异常东亚冬季风的相互作用及其过程, 特别指出强东亚冬季风所造成的赤道西太平洋地区西风 and 积云对流的持续强异常将分别引起海洋 Kelvin 波和大气季节内振荡的异常, 通过海-气耦合相互作用, 最终将导致 El Niño 的发生^[6,7]。

80 年代以来数值模拟已成为研究 ENSO 的重要工具之一, 但尚无用 GCM 来数值模拟研究东亚冬季风异常对 ENSO 发生的作用。本文将分别用热带太平洋海洋模式 (OGCM) 和海-气耦合模式 (CGCM) 进行数值模拟, 进一步指出异常东亚冬季风对 ENSO 的重要激发机制。

1997-11-06 收到

* 国家自然科学基金 49635180 资助项目

2 模式及模拟试验

本研究首先使用的是中国科学院大气物理研究所发展的 14 层热带太平洋环流模式 (IAP-OGCM), 模式范围为 ($120^{\circ}\text{E} \sim 69^{\circ}\text{W}, 30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$), 水平分辨率为 2° 经度 $\times 1^{\circ}$ 纬度, 模式考虑了真实的热带太平洋海陆边界。这个 OGCM 的最大特点是海表面为自由面, 海面高度是预报量; 同时在海洋热力学变量的计算中引入了标准层结近似, 减少了截断误差。有关这个 OGCM 模式及其对海洋平均态的模拟结果可参阅文献[8]和[9]。

将上述 OGCM 与二层全球大气环流模式 (IAP-AGCM-2) 相耦合, 便是本研究所使用的海-气耦合模式 (CGCM)。关于 IAP-AGCM-2 已有许多文章介绍, 文献[11]是美国能源部印制的该模式的版本, 该模式对东亚季风变化的模拟已有很好的分析; 在国际模式相互比较计划中该模式已被证明是全世界有较好模拟能力的少数 AGCM 之一^[12]。

在本文的数值模拟试验中, 分别都有对照试验 (CE) 和异常试验 (AE)。用 OGCM 时, 其对照试验是模式积分的第 22 年到第 24 年的结果, 其状态可以代表海洋的一般状况 (海温、海流等); 异常试验则是假定有异常东亚冬季风的情况, 考虑到资料分析的已有结果, 东亚冬季风异常意味着在西北太平洋靠近亚洲大陆地区应该有北风 (应力) 异常, 而在赤道西太平洋应有西风 (应力) 异常。

在用 CGCM 进行数值模拟时, 对照试验是用 CGCM 模式积分的第 50 年到第 52 年的结果, 它同样可代表海-气系统的一般状况; 异常试验则根据东亚冬季风发生的特征, 假定在亚洲大陆的北部有地面气压和地面气温的异常, 正 (负) 气压异常和负 (正) 气温异常则表示冬季风偏强 (弱) 的形势。

本文异常试验均由第 1 年的 11 月积分到第 3 年的 4 月。异常试验结果与对照试验结果的差值, 即 $\text{AE}-\text{CE}$, 也就表示异常东亚冬季风对赤道太平洋的影响, 或者说反映了异常东亚冬季风对 ENSO 的激发作用。

目前国际上所有的 CGCM 试验中都遇到过所谓的“气候漂移”问题, 为了克服“气候漂移”, 一般都采用通量订正的方法。经过一系列试验, 在本文试验中采用了较一般通量订正更好的海表面强迫量线性统计修正同步耦合方案, 它不仅有效地消除了“气候漂移”, 而且能够使模式保持较好的季节变化和年际变化特征^[13]。这个方案可简述如下:

(1) 海洋模式输出前 1 天的 SST 作为大气模式的强迫场, 把大气模式积分 1 天得到当天的“大气状态”。

(2) 用当天的“大气状态”对海表面风矢量按下式作修正, 即

$$\bar{V}^c = \alpha_0(x, y) + \alpha_1(x, y)\bar{V}_{800} + \alpha_2(x, y)\bar{V}_{400}, \quad (1)$$

其中 α_0 、 α_1 和 α_2 采用统计方法确定; 而对海表热通量计算可参数化表示成

$$Q_i^c = D^c(T_A^c - T_O^c), \quad (2)$$

其中

$$D^c = D(f_i) \approx a + bD, \quad T_A^c = T_A(f_i) \approx a + bT_A^*,$$

D 和 T_A^* 都是大气要素场的函数, 可由当天大气状态求得; a 和 b 可用统计方法确定。

(3) 根据上述风应力强迫场和海表热通量, 则可把海洋模式积分 1 天, 从而得到当天的“海洋状态”。

(4) 重复上述步骤, 即可实现同步耦合的计算。

3 海洋环流模式 (OGCM) 的模拟结果

观测资料的分析清楚表明, 东亚冬季风的强 (弱) 异常将在东亚和西北太平洋地区的近地面层产生北 (南) 风异常, 而在赤道西太平洋地区产生西 (东) 风异常; 赤道太平洋纬向风的异常还是逐渐向东传播的。由于 OGCM 中无法直接引入异常风场, 在模式中只有用改变风应力代替异常风场。图 1 是引入异常风 (应力) 场的地理位置, 其中赤道太平洋纬向风 (应力) 的异常是随时间东传的。在异常试验中相当于在第 1 年的 11 月到第 2 年的 4 月期间西北太平洋地区有北 (南) 风异常 (中心值为 5 m/s), 而在第 1 年的 12 月到第 2 年的 6 月期间赤道西太平洋地区有西 (东) 风异常 (中心值为 4 m/s)。

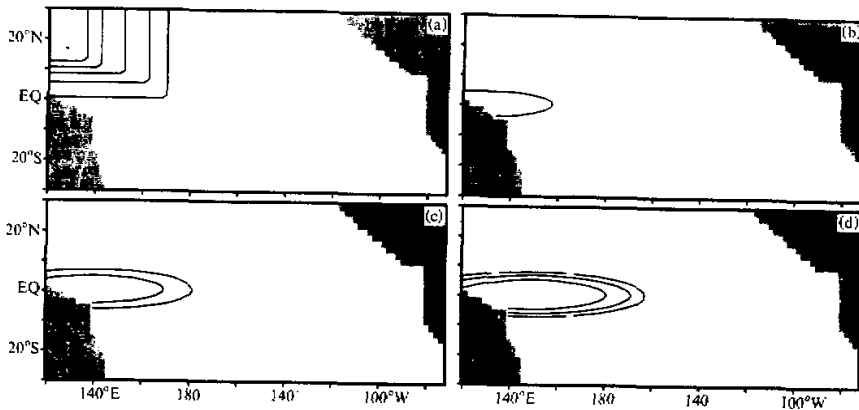


图 1 热带太平洋环流模式数值试验中的异常风 (应力) 场形势 (等值线间隔: 1 m/s)

(a) 异常经向风; (b) 异常纬向风 (2 月); (c) 异常纬向风 (4 月); (d) 异常纬向风 (6 月)

图 2 给出的是在西北太平洋地区有异常北风而在赤道西太平洋地区有异常西风, 即在冬半年有持续强冬季风情况下, 由 OGCM 得到的 Niño 3 区和 Niño 1+2 区海表水温 (SST) 异常的时间演变。可以清楚地看到从第 2 年的 1 月到 10 月期间赤道太平洋出现了明显的 SST 正异常, 最大异常超过 2°C 。图 3 分别给出了在冬半年有持续强冬季风情况下, 由 OGCM 得到的 3 个月平均的 SST 异常的水平分布, 其中实线和虚线分别表示 SST 的正距平和负距平。可以清楚地看到冬半年的持续强冬季风在赤道中东太平洋激发出了大片 SST 正距平, 而在赤道西太平洋激发出了 SST 负距平。同图 3 所

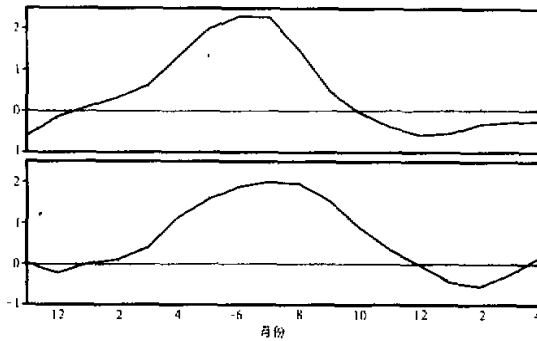


图 2 冬半年持续强东亚冬季风在 OGCM 中激发的海表水温异常 (SSTA) 的时间变化 上图为 Niño 3 区平均 SSTA (°C); 下图为 Niño 1+2 区平均 SSTA (°C)

时间延迟到第 2 年 10 月 (实际 El Niño 事件情况正是如此), 那么 SST 正异常的时间可以持续到第 3 年的 3 月 (图略)。

对于冬半年东亚有持续弱冬季风的情况 (西北太平洋地区有南风异常, 而赤道太平洋地区有异常东风), OGCM 得到了同图 2 和图 3 形式相近但符号相反的结果, 弱东亚冬季风的影响在 Niño 3 和 Niño 1+2 区都造成了持续的负 SST 异常 (图 4), 热带太平洋 SST 的分布和演变有些类似 La Niña 的特征 (图 5)。同样, 赤道太平洋海平面高度的异常也呈现出与 La Niña 相类似的异常海平面高度分布特征 (图略)。也就是说, 冬半年东亚的持续弱冬季风将在赤道中东太平洋地区激发出 SST 负距平, 有利 La Niña 的发生。

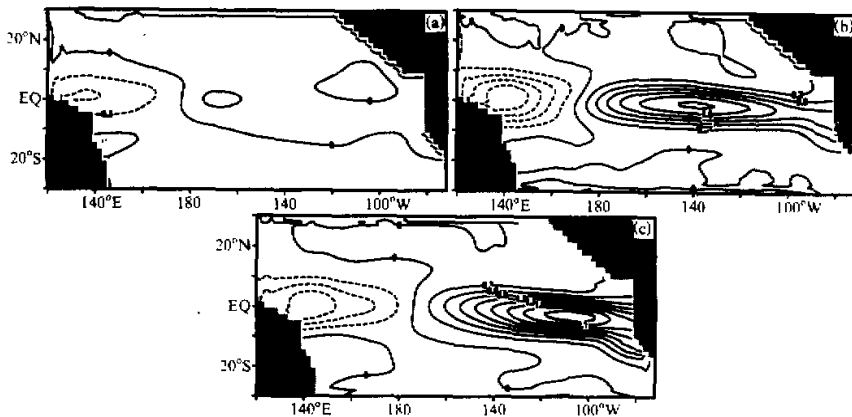


图 3 冬半年持续强东亚冬季风在 OGCM 中激发的热带太平洋 SSTA (°C) 的分布 (a)、(b) 和 (c) 分别为第 1 年 12 月~第 2 年 2 月、第 2 年 3~5 月和 6~8 月的平均; 实线和虚线分别表示正异常和负异常

示的 SSTA 分布相对应, 热带中东太平洋海平面高度为正异常, 而赤道西太平洋海平面高度为负异常 (图略)。

将图 2 和图 3 同实际 El Niño 情况下赤道太平洋地区 SST 的异常情况和分布相比较, 有许多相似之处, 主要差异只是图 2 中 SST 正异常的时间略较实际情况为短。这是因为在图 2 的试验中赤道西风异常只到第 2 年的 6 月份就结束了, 比实际情况时西风异常的时间为短; 如果将西风异常

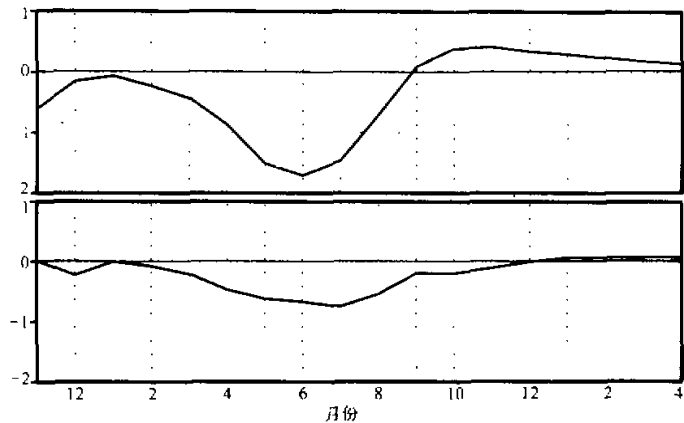


图 4 冬半年持续弱东亚冬季风在 OGCM 中激发的 SSTA 的时间变化
上图为 Niño 3 区平均 SSTA (°C)；下图为 Niño 1+2 区平均 SSTA (°C)

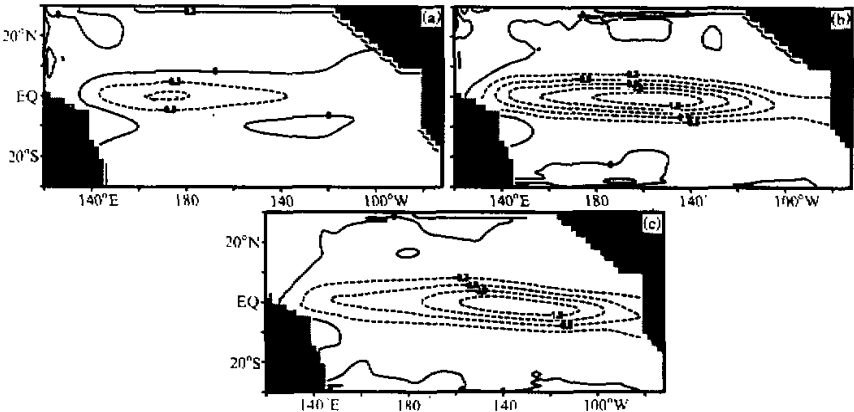


图 5 冬半年持续弱东亚冬季风在 OGCM 中激发的热带太平洋 SSTA (°C) 的分布
(a)、(b) 和 (c) 分别表示第 1 年 12 月~第 2 年 2 月、第 2 年 3~5 月和 6~8 月的平均；
实线和虚线分别表示正异常和负异常

4 海-气耦合模式的模拟结果

许多资料分析研究已表明，强东亚冬季风（东亚寒潮）的发生总是在西伯利亚和蒙古地区有较强冷高压形成并向东南方向扩展，东亚地区高空槽加深明显，东亚沿海及西北太平洋地区有持续强北风。为了表示强东亚冬季风异常，我们在用 CGCM 作异常数值试验时，在亚洲大陆北部地区引入了正气压距平和负气温距平，其异常中心在贝加尔

湖以南地区, 中心值分别为 14 hPa 和 -4°C 。在模式积分过程中, 上述异常场在第 1 年的 11 月到第 2 年的 6 月期间存在。

图 6 是在冬半年有东亚冬季风持续偏强情况下, 由 CGCM 所得到的赤道中东太平洋地区 SST 异常的时间演变, 无论是 Niño 3 或是 Niño 1+2 地区的平均, 都出现了持续的海温正距平。图 7 是本组数值试验中热带太平洋 SST 异常的水平分布, 很明显在赤道中东太平洋有大片持续的正异常出现, 而在赤道西太平洋有弱的负异常产生。换句话说, 由于冬半年有持续的强东亚冬季风存在, 在 CGCM 中很清楚地激发出了类似于 El Niño 事件时的赤道中东太平洋 SST 正异常和赤道西太平洋 SST 负异常的形势。

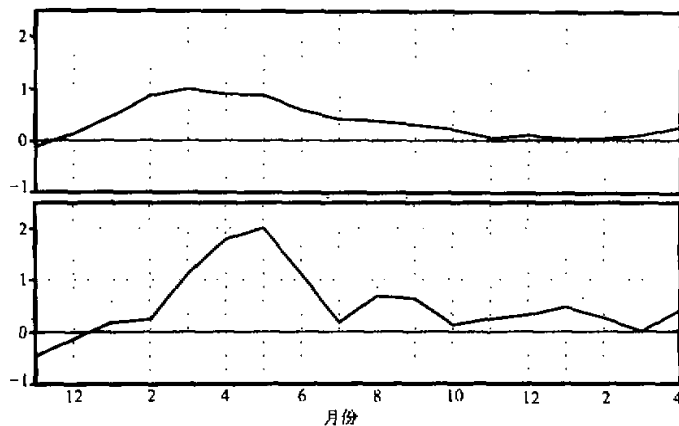


图 6 冬半年持续强东亚冬季风在 CGCM 中激发的 SSTA 的时间变化
 上图为 Niño 3 区平均 SSTA ($^{\circ}\text{C}$); 下图为 Niño 1+2 区平均 SSTA ($^{\circ}\text{C}$)

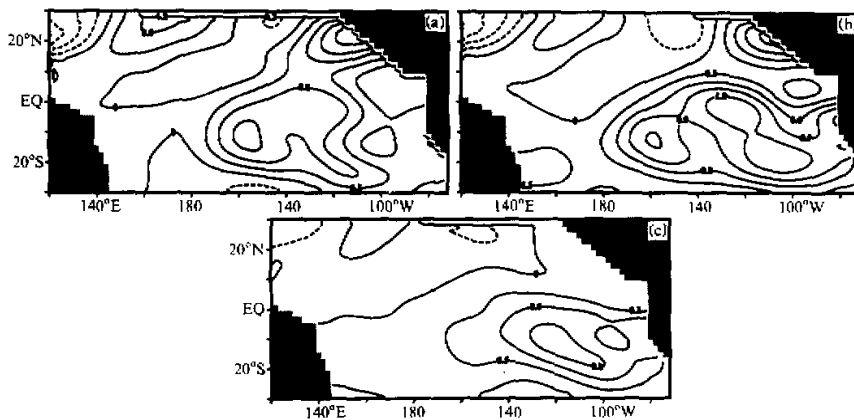


图 7 冬半年持续强东亚冬季风在 CGCM 中激发的热带太平洋 SSTA 的分布
 (a)、(b) 和 (c) 分别表示第 1 年 12 月~第 2 年 2 月、第 2 年 3~5 月和 6~8 月的平均;
 实线和虚线分别表示 SST 正异常和负异常 ($^{\circ}\text{C}$)

对于冬半年东亚冬季风持续偏弱的情况（亚洲大陆中高纬度地区地面气压为负距平，气温为正距平），CGCM 数值模拟结果同图 6 和图 7 大致相反，赤道中东太平洋有持续 SST 负距平出现（图略），表明持续东亚弱冬季风有利于 La Niña 的发生。

5 物理过程的分析

异常海洋 Kelvin 波已被许多研究视为激发 ENSO 的重要因素；有关 El Niño 与热带大气季节内振荡的研究又清楚地表明它们存在明显的相互作用，尤其是 El Niño 事件爆发前，热带（特别是在赤道西太平洋地区）大气季节内振荡有异常加强现象，伴随 El Niño 的发生，热带大气季节内振荡的动能急剧减弱^[14,15]。上述异常 Kelvin 波和强热带大气季节内振荡为何会发生呢？这在李崇银的研究中已经指出，即东亚冬季风的强异常将使赤道西太平洋地区信风减弱和对流活动加强，前者将激发异常海洋 Kelvin 波，后者将激发出强的大气季节内振荡；通过海气相互作用，这两者将对 El Niño 事件的发生起重要激发作用^[16]。

本节我们将通过对模式输出资料的分析，进一步探讨上述东亚冬季风异常对 ENSO 激发的物理过程。

首先讨论异常海洋 Kelvin 波的活动。以 OGCM 的模拟为例，图 8 是强东亚冬季风情况下，模式第 2 年的海面高度异常的逐月分布，可以看到在赤道中东太平洋有正异常，在赤道西太平洋有负异常，而且正负异常不断加强且沿赤道缓慢东移；同时海面高

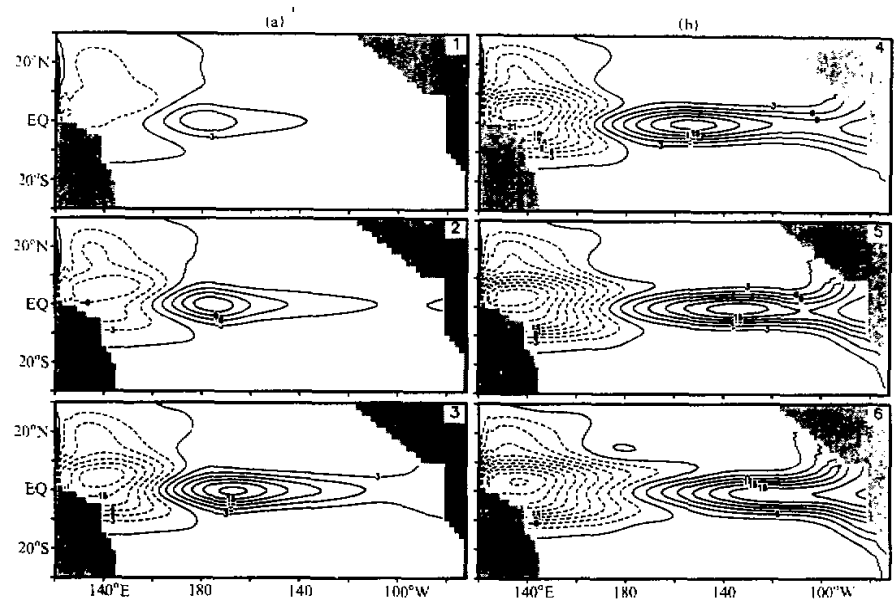


图 8 热带太平洋环流模式模拟得到的强东亚冬季风情况下热带太平洋海面高度异常的逐月分布
(模拟第 2 年 1~6 月)

度异常主要在赤道南北纬以内, 并与赤道呈对称。与之类似, 赤道太平洋的 SST 也有同样的演变特征 (图略), 赤道中东太平洋的 SST 正距平和赤道西太平洋的 SST 负距平也随时间增强并缓慢东移。因此, 上述赤道太平洋海表的特征和演变, 充分表明了 Kelvin 波的活动特征, 并显现了这种 Kelvin 波的活动对 El Niño 的发生起着重要作用。而这种异常 Kelvin 波 (因与正 SSTa 相伴移动, 可视为暖性) 的出现, 正是强东亚冬季风引起的赤道西风异常激发产生的。

如果东亚冬季风偏弱, 数值模拟结果也出现一种东传的 Kelvin 波, 但其位相与图 8 相反, 在赤道中东太平洋的 SST 负距平和海平面高度负距平是主要的, 而在赤道西太平洋的正距平比较弱 (图略); 弱东亚冬季风激发的这种 Kelvin 波 (因与负 SSTa 相伴移动, 可视为冷性) 的出现, 显然对 La Niña 的发生有重要作用。

关于东亚冬季风异常激发热带大气季节内振荡的异常, 可以用海-气耦合模式的模拟结果表示。我们先用递归带通 (30~60 天) 滤波器对模拟得到的 u 和 v 场进行带通滤波处理, 便可计算得到热带大气季节内 (30~60 天) 振荡的动能, 其大小也就反映了季节内振荡的强弱程度。图 9 分别给出了对应控制 (对照) 试验、强东亚冬季风和弱东亚冬季风 3 种情况下, 海-气耦合模式得到的赤道西太平洋 ($10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$) 地区平均的 400 hPa 上季节内振荡动能的时间演变。通过比较不难发现, 对于强东亚冬季风, 热带大气季节内振荡要强于对照试验情况, 尤其是在模式第 1 年的 12 月到第 2 年的 2 月期间; 而对于弱东亚冬季风则相反, 热带大气季节内振荡要比对照试

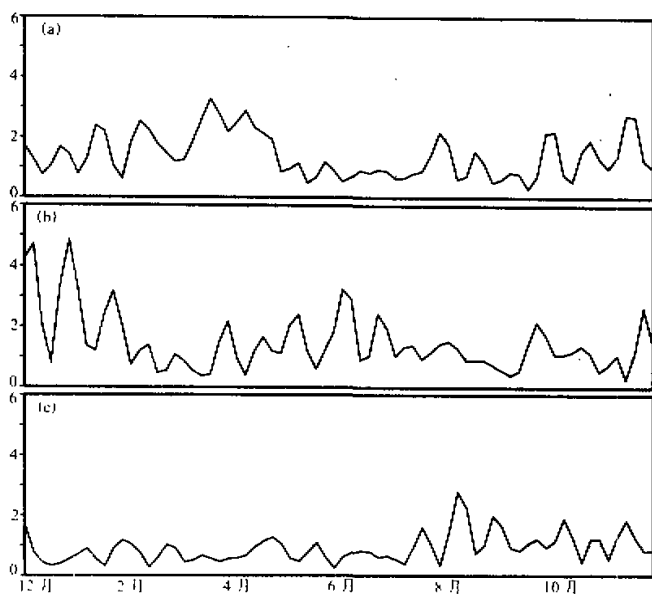


图 9 海-气耦合模式得到的赤道西太平洋 ($10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$) 地区 400 hPa 上大气季节内振荡动能的时间演变

(a) 控制试验结果; (b) 强东亚冬季风的模拟结果; (c) 弱东亚冬季风的模拟结果

验情况明显偏弱, 也就是说, 与观测资料分析的结果一致, 对于强(弱)东亚冬季风, CGCM 数值模拟也得到了强(弱)的热带大气季节内振荡的异常。

上述有关异常海洋 Kelvin 波和异常热带大气季节内振荡的模拟和分析, 十分清楚地表明东亚冬季风的异常可以通过赤道西风异常和对流活动异常而激发出异常的海洋 Kelvin 波和热带大气季节内振荡的明显异常, 在海-气相互作用下, 最终导致 ENSO 的发生。

6 结 语

自从我们的研究指出强东亚冬季风对 El Niño 事件有明显激发作用以来, 季风与 ENSO 的相互作用已引起各国科学家的极大重视, 并成为国际 CLIVAR (气候变化和预测研究) 计划的重要研究内容之一, 未来十多年人们将会对此有清楚的认识。

本文首先就异常东亚冬季风对热带太平洋(海面高度、SST 及海流等)的重要作用分别用 OGCM 和 CGCM 进行了数值模拟试验。数值模拟结果极为清楚地表明, 无论用 OGCM 还是用 CGCM, 持续强东亚冬季风可以激发出 El Niño 型暖事件; 持续弱东亚冬季风可以激发出 La Niña 型冷事件。也就是说, GCM 数值模拟进一步证实了我们在资料诊断和理论分析中已得到的重要结论, 即异常的东亚冬季风是一个激发产生 ENSO 的重要机制。

同观测资料的分析相一致, 数值模拟更为清楚地表明东亚冬季风的异常所引起的赤道西太平洋地区的西风异常和积云对流活动异常, 将产生海洋 Kelvin 波(强冬季风对应暖性 Kelvin 波, 弱冬季风对应冷性 Kelvin 波)和异常热带大气季节内振荡(强冬季风对应强季节内振荡, 弱冬季风对应弱季节内振荡), 通过海-气相互作用, 它们将成为激发 ENSO 的重要物理过程。

参 考 文 献

- 1 Wyrski, K., 1975, El Niño — the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, 572~584.
- 2 McCreary, J. P. and D. L. T. Anderson, 1984, A simple model of El Niño and the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 934~946.
- 3 Schopf, P. S. and M. J. Suarez, 1988, Oscillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 549~567.
- 4 李崇银, 1988, 频繁强东亚槽活动与 El Niño 的发生, *中国科学(B)*, **18**(6), 667~674.
- 5 李崇银、陈于湘、袁重光, 1988, El Niño 事件发生的一个重要原因东亚寒潮的频繁活动, *大气科学(特刊)*, 125~132.
- 6 李崇银, 1989, 中国东部地区的暖冬与 El Niño, *科学通报*, **34**, 283~286.
- 7 Li Chongyin, 1990, Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events, *Adv. in Atmos. Sci.*, **7**, 36~46.
- 8 张荣华, 1995, 一个自由表面热带太平洋环流模式及其应用, *中国科学(B)*, **25**, 204~210.
- 9 Zhang, R.-H. and M. Endoh, 1994, Simulation of 1986-1987 El Niño and 1988 La Niña events with a free surface tropical Pacific Ocean general circulation model, *J. Geophys. Res.*, **99**(C4), 7743~7759.
- 10 Zeng Qingcun et al., 1989, Documentation of IAP Two-Level Atmospheric General Circulation Model, TRO-44, DOE/ER/60314-HI, United States Department of Energy.

- 11 曾庆存、梁信忠、张明华, 1988, 季风和大气环流季节突变的数值模拟, 大气科学 (特刊), 北京: 科学出版社, 22~42.
- 12 Sperber, K. R. and T. N. Palmer, 1995, Terannual tropical rainfall variability in general circulation model simulations associated with the atmospheric model intercomparison project. PCMDI report. No.28, UCRL~ID-121725.
- 13 周广庆, 1996, 热带太平洋和全球大气耦合环流模式的设计和气候的数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士论文.
- 14 李崇银、周亚萍, 1994, 热带大气季节内振荡和ENSO的相互关系, 地球物理学报, 37, 17~26.
- 15 李崇银、李桂龙, 1995, 同El Niño发生相互联系的热带大气系统动能的变化, 科学通报, 40, 1866~1869.
- 16 李崇银, 1995, 气候动力学引论, 北京: 气象出版社, 253~269.

Numerical Simulations of Anomalous Winter Monsoon in East Asia Exciting ENSO

Li Chongyin and Mu Mingquan

*(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)*

Abstract In this paper, we investigate influences of anomalous winter monsoon in East Asia on the equatorial Pacific Ocean with tropical Pacific ocean model (OGCM) and coupled ocean-atmospheric general circulation model (CGCM), respectively. The results clearly show that continually stronger winter monsoon is able to lead to obviously positive sea surface temperature anomaly (SSTA) in the equatorial central and the eastern Pacific Ocean and its horizontal distribution is well identical with the large-scale feature of natural El Niño events; however, consecutively weaker winter monsoon will make SST decrease in that area and its pattern can be compared to La Niña. Therefore, numerical experiments further prove the conclusion unraveled based on the observed data diagnoses and theoretical analyses in the previous studies — anomalous winter monsoon in East Asia is an important exciting mechanism of ENSO; the simulation results also show that the anomalous Kelvin waves in the ocean and the anomalies of atmospheric intraseasonal oscillation caused by anomalous winter monsoon play an important role in the occurrence of ENSO as that shown in the observation.

Key words East-Asian winter monsoon ENSO Kelvin wave tropical atmospheric intraseasonal oscillation