

一个混合型热带海洋-大气耦合模式

I. 模式构成及热带太平洋气候态模拟

张荣华 曾庆存 周广庆

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 本工作发展了一个用于研究热带海洋-大气系统相互作用和 El Niño / Southern Oscillation 动力过程的混合型(hybrid)耦合模式, 其中的大气部分为一个由一阶斜压模表示的自由大气和混合行星边界层所组成的简单热带大气模式(区域为热带太平洋: $120^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{S}$; 水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$), 海洋部分为大气物理研究所高分辨率自由表面热带太平洋环流模式(经纬圈方向水平分辨率分别为 1° 和 2° , 垂直方向分为不等距的 14 层)。两模式间的耦合是这样进行的: 简单大气模式计算出海表风应力, 热通量由松弛公式计算, 淡水通量(蒸发与降水之差)由观测资料给定, 它们一起作为海洋环流模式(OGCM)的强迫场; 而 OGCM 计算出海表温度(SST), 在其以外地区给定观测到的气候海表温度或陆地温度, 作为大气模式的边界条件。本文给出采用逐日、同步耦合方案时模式对热带太平洋气候态模拟结果, 表明未采用任何通量修正(fluxes correction), 耦合模式未出现气候漂移(climate drift)现象, 并且非常逼真地再现了热带太平洋气候态, 特别是海表风场及相伴的辐合带和降水、海表温度和流场及它们的季节变化。文中还进行了对耦合模式的比较研究, 以验证其良好性能和对实际热带太平洋气候系统的模拟能力。

关键词 简单大气模式 海洋环流模式 海气耦合 气候态模拟

1 引言

影响全球气候异常并带来巨大经济损失的厄尔尼诺/南方涛动(El Niño / Southern Oscillation 简称 ENSO)现象不仅得到学术界的高度重视和强化研究, 而且为国际社会和各国政府所深切关注。Bjerknes^[1]最早把 El Niño 事件和 Southern Oscillation 现象作为整体加以研究, 并揭示了 ENSO 与热带海气相互作用间的内在联系, 奠定了近代 ENSO 研究的基础。近几十年来, 广泛的国际合作和深入研究, 已在 ENSO 形成过程和产生的物理原因等方面取得了重大进展。

ENSO 年际气候异常是热带海气相互作用的一个突出表现, 是海气双向耦合的产物。海气相互作用使得耦合系统呈现出海洋、大气各单独系统所不曾有的现象, 增加了耦合系统的复杂性和多样性; 同时, 正是这种耦合效应提供了年际气候异常预报的物理基础。为进一步弄清海气相互作用产生年际振荡机制和气候系统季节变化与年际振荡间的关系, 以及准确有效地预测其发生、发展, 学术界已进行了大量的观测诊断、理论分析和数值模拟, 特别是发展了几类海气耦合模式^[2], 如简单或概念型(Conceptual)模

1994-02-25 收到, 1994-05-11 收到修改稿

* 国家基础性研究重大关键项目“气候动力学和气候预测理论的研究”及大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室资助项目

式^[4]、中间型(Intermediate)模式^[4]、混合型(Hybrid)模式^[5]和环流型(General Circulation)模式^[6]。这些复杂程度不同的耦合模式特色各异、优势互补。虽然它们已在认识、模拟和预测 ENSO 中起了重大作用,但模式结果与观测间仍有较大误差,随着观测资料的增多,模式真实性有待于进一步验证;同时也表明,各模式间存在显著差异,说明结果对模式构成的强烈敏感性。为此,在现有 ENSO 理论研究成果和耦合模式发展基础上,应发展更为有效的海气耦合模式,一方面可进行不同模式间的比较研究^[7],以认识模式误差及模式间差别的原因,为进一步改进模式提供合理依据;另一方面为研究海气相互作用机制及年际变率预测等提供强有力的数学工具。

在本工作中,我们将发展一个混合型热带海洋-大气耦合模式(Hybrid Coupled Model, 简称 HCM),其中大气部分为夏威夷大学 Wang 和 Li 所发展的一个简单热带大气模式^[8](简称 WL);海洋部分为大气物理研究所高分辨率的自由面而热带太平洋环流模式^[9, 10](简称 IAP OGCM)。考虑到目前所发展的许多耦合模式相对于观测及未耦合各分量模式而言普遍存在所谓的气候漂移(Climatic drift)的显著差异,作为发展耦合模式的第一步,本文给出模式构成及对热带太平洋大气和海洋环流气候态(平均场及其季节变化)模拟结果,以考察所发展的 HCM 的实际模拟能力,特别作为海气双向耦合模式(modes)之一的季节变化也是海气相互作用的产物, HCM 对这种最常见的季节变化模拟将是对模式性能极为严格的检验。

2 简单热带大气模式和海洋环流模式(OGCM)简介

2.1 简单热带大气模式^[8]

用简单模式对热带大气运动进行研究由来已久、方兴未艾。Matsuno^[11]用浅水方程从理论上分析了热带运动自由波解; Gill^[12]采用单一斜压模近似给出外界非绝热加热所产生的热带运动定常解。随后,大量的工作都是在 Gill 模式的框架基础上,研究如何把热带低层辐合所致的积云对流产生的凝结加热参数化,并提出了一些具体方案,如非绝热加热由 SST 非线性参数化、第二类条件性不稳定(CISK)等。这类 Gill 模式不足之一是需要较大的动量耗散系数,模式结果对参数非常敏感,并且不能描述边界层过程。另一方面, Lindzen 和 Nigam^[13](简称 LN)从完全不同的角度分析了 SST 在驱动低层大气流场中的作用,在忽略对流凝结潜热的热力强迫作用,而仅考虑 SST 水平梯度的动量强迫作用,并适当选取参数时, LN 得到与实际较为一致的流场。这一模式的明显不足是仅能描述边界层过程,且模式对参数选择也较为敏感。基于这些考虑, WL 把 Gill 和 LN 模式有机地结合起来,发展了一个由一阶斜压模表示的自由大气和混合行星边界层所组成的简单热带大气模式^[8]。图 1 给出了该模式的垂直结构简图,模式的动力过程包括由与 SST 梯度相联系的动量强迫所驱动边界层流场($\vec{V}_B$)和由 SST 热力效应所制约的非绝热加热所致的自由大气流场($\vec{V}$)间的相互作用;模式的热力过程采用依赖于 SST 的条件性加热(一种改进的 CISK)方案进行参数化(其中假定对流不稳定性随 SST 呈非线性增长)。有关此模式的动力方程和热力过程、模式参数等详见文献[8]。此模式方程用有限差分法求解,区域为热带太平洋地区(30°N~30°S, 120°E~80°W),水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。

2.2 IAP 海洋环流模式简介^[14~15]

耦合模式的海洋部分是大气物理研究所发展的高分辨率、自由表面热带太平洋 OGCM, 它从目前国际上广泛使用的 OGCM 基本方程组^[16]出发, 清除“刚盖”近似, 并分别进行热力场的标准层结扣除、垂直坐标变换和因变量替换, 可得保持总有效能量守恒的 IAP OGCM 基本方程组^[9]。

图 1 给出了 OGCM 垂直结构简图, 其垂直上边界条件可写为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 0, \\ \dot{\sigma} = 0, \\ p' = \frac{p'_a}{\rho_m} + H_0, \\ \frac{g\rho_m A_{MV}}{\Phi^2} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = (\tau_x, \tau_y), \\ \frac{g\rho_m c_p A_{TV}}{\Phi^2} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = Q_T, \\ \frac{g\rho_m A_{SV}}{\Phi^2} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = S_s Q_S, \end{array} \right.$$

式中 $\sigma = (z - z_0) / (h_s + z_0)$, z_0 为海面起伏, h_s 为海底地形; ρ_m 为海水平均密度; $H_0 = gz_0$; $\Phi = \sqrt{g(h_s + z_0)}$; g 为重力加速度; c_p 为海水定压比热; p'_a 为海表面大气扰动压力场(暂取为零); u 、 v 、 T 、 S 分别为海水流速分量、温度和盐度; (τ_x, τ_y) 分别为海表风压力分量; Q_T 和 Q_S 分别为海表热通量和净淡水通量; T_s 和 S_s 分别为海表温度和盐度; A_{MV} 为动量垂直耗散系数, A_{TV} 和 A_{SV} 分别为温、盐度垂直扩散系数, 它们按下式与表征洋流切变和层结稳定度参数的 Richardson 数有关

$$\left\{ \begin{array}{l} Ri = \frac{-\frac{g}{\rho_m} \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2}, \\ A_{MV} = \frac{A_{MO}}{(1 + 5Ri)^2} + A_{MB}, \\ A_{TV} = A_{SV} = \frac{A_{MV}}{1 + 5Ri} + A_{TB}, \end{array} \right.$$

其中 A_{MB} 、 A_{TB} 分别为动量、温盐度标准垂直耗(扩)散系数, 取值为 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; A_{MO} 为常数, 取值为 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

热带太平洋环流模式区域东西范围从 120°E 到 69°W , 南北范围从 30°N 到 30°S ; 模式暂未考虑海底地形(取 4000 m 深), 但考虑热带太平洋真实海陆边界。模式水平分辨率为 2° (纬圈方向)和 1° (经圈方向); 垂直方向模式分为间距不等的 14 层。模式的水平摩擦和扩散系数在 10° 赤道以内取为 $2 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$, 而在其外更高纬地区线性增加以

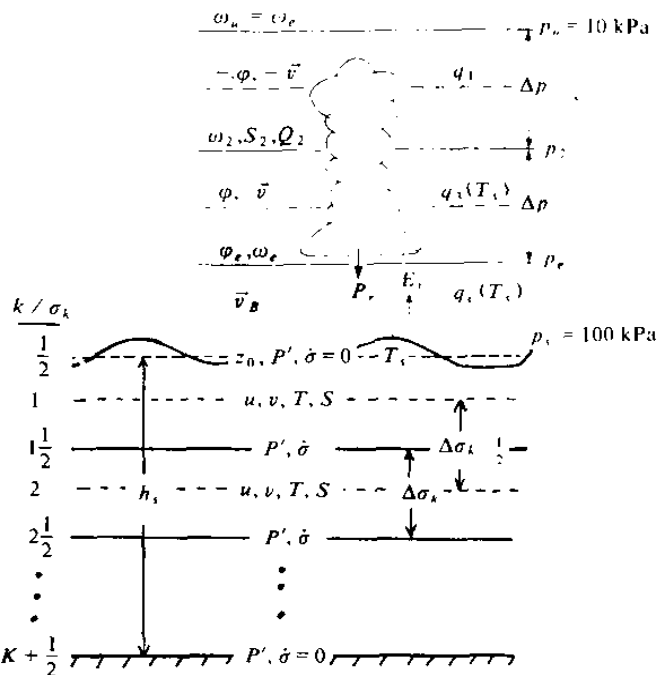


图 1 混合型海气耦合模式垂直结构简图
大气部分取自 WL(垂直方向分为 P_e 以上的自由大气和其下的行星边界层); 海洋部分取自文献^[9]

致到 $30^{\circ}\text{N}(\text{S})$ 值为 $3 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$; 模式中还考虑发生静力不稳定时所采用的对流调整。模式的水平侧边界取为无滑动和无通量条件, 但在模式的南北边界(即 $30^{\circ}\text{N}(\text{S})$) 区温盐方程中包含松弛项 $r(T^* - T)$ 和 $r(S^* - S)$, 其中 r 为牛顿冷却系数(其值取为 $(60 \text{ d})^{-1}$), T^* 和 S^* 由 Levitus 观测资料给定(可随季节而变)。

3 海洋、大气模式间的耦合

大气模式和 OGCM 变量垂直分布如图 1 所示, 其中一些海气界面通量计算公式为

$$\bar{\tau} = \rho_{as} C_D |\bar{V}_s| \cdot \bar{V}_B, \quad (1)$$

$$Q_T = D(T_{as} + \frac{Q_1}{D} - T_s), \quad (2)$$

$$Q_S = E_s - P_r, \quad (3)$$

这里 ρ_{as} 和 T_{as} 分别为海表大气密度和温度, $\bar{V}_B$ 为大气模式低层风场: $|\bar{V}_s| = \max(|\bar{V}_B|, 2)$; E_s 和 P_r 分别为海面蒸发和降水; D 和 Q_1 分别为计算海表热通量参数, 其计算公式详见文献[15]; C_D 为拖曳系数, 取值为 $\min(1 \times 10^{-3} + 7 \times 10^{-8} |\bar{V}_s|, 2.5 \times 10^{-3})$ 。在本工作中, D 、 T_{as} 、 Q_1 、 E_s 和 P_r 分别由观测资料给定(可随季节而变)。这样, 给定下垫面温度 T_s 可由大气模式计算出热带太平洋低层风场($\bar{V}_B$), 作为 OGCM 的边条件; 再由大气强迫场($\bar{\tau}$ 、 Q_T 和 Q_S)驱动 OGCM 计算出 SST, 又作为大气模式的边条件, 将两模式耦合起来。

已有理论研究和数值模拟试验表明, 海气模式间的耦合方案是至关重要的。在耦合模式发展初期, 因模式和计算条件的限制, 采用所谓的非同步(asynchronous)耦合; 目前, 耦合模式大多已采用同步(synchronous)耦合。耦合模式另一问题是存在气候漂移, 为此采用通量修正技术以求模式有较真实的气候态^[17~19]。综合现有各种耦合方案, 可将海气耦合模式间交换变量(F)写成

$$F = \alpha F_o + \beta F_c - \gamma F_u, \quad (4)$$

其中 F 可为 SST 或海表风应力等; 下标 o、c 和 u 分别表示观测、耦合和未耦合模式变量; α 、 β 和 γ 为系数, 表示不同的耦合方式。如取 $\beta = \gamma = 0$, 表示未耦合; 取 $\alpha = \gamma = 0$, 表示完全耦合; 取 α 、 β 和 γ 都不为零, 表示“部分”耦合, 这时考虑了实际观测和未耦合模式模拟资料对耦合时间积分的影响, 即通量修正, 并且如仅修正大气或海洋模式变量时称单向修正^[5], 如同时修正两分量模式交换变量称双向修正^[17~19]。我们将考察不同耦合方式(即不同 α 、 β 、 γ 参数取值)对模式性能的影响。

4 未耦合大气、海洋模式模拟简介

作为耦合模式的基础, 我们在此简要地说明一下简单大气模式和 OGCM 未耦合时模拟情况, 即取方程(4)中 $\beta = \gamma = 0$ 。这时, 海气界面所必要的边界条件取自观测资料。

在观测到的 SST 和陆表温度强迫作用下, WL 已进行了大量的数值模拟及敏感性试验, 证实了该模式能非常真实地描述观测到的热带太平洋海表风场及相伴随的辐合带(ITCZ 和 SPCZ)和降水分布; 分别改进了单独的 Gill 模式和 LN 模式误差; 特别减小

了模式结果对参数的强烈敏感性; 并且模式能直接计算总环流和总加热场, 而不仅仅是其异常分布。对于较高分辨率的自由表面热带太平洋 OGCM, 张荣华等也已进行了大量的数值试验, 如热带太平洋平均环流及其季节变化^[9]、1986~1987 年 El Niño 和 1988 年 La Niña 事件^[20]等的数值模拟, 并且详细地比较了模式结果与热带太平洋海岛站和地球卫星海面起伏观测资料以及与由 Mooring 测量得到的表层和次表层温流场; 同时还进行了这一模式与国际上广泛使用的 GFDL OGCM^[16]间的比较研究, 说明该模式能成功地再现观测到的热带太平洋平均环流及其季节和年际变化, 充分表明模式的优良性能和广阔的应用前景^[10]。

5 耦合模式对热带太平洋气候态模拟

5.1 数值试验的设计

用上面给出的热带大气模式和 OGCM 进行耦合积分。HCM 中 OGCM 的初条件是在 Hellerman-Rosenstein 风应力及观测到的热通量和淡水通量(按方程(1)~(3)计算)驱动下季节变化积分三年后的终值, 其平均态及季节变化已在文献[9]中有详述。大气模式初条件是年平均 AMIP¹⁾SST 强迫作用下积分一个月后的定常解。两模式间的耦合未采用任何通量修正(取方程(4)中 $\alpha=\gamma=0$, $\beta=1$)并逐日同步进行: 大气模式计算出海表风应力, 其日平均值连同由公式(2)计算出的热通量和观测给定的淡水通量作为 OGCM 的强迫场; OGCM 计算出 SST, 其日平均值连同 OGCM 计算区域以外由 AMIP 给定的 SST 或陆表温度, 作为大气模式的边条件, 为使 OGCM 计算的 SST 和 AMIP SST 间连续过渡, 在其交界区进行必要的平滑处理。这样, 耦合系统在随季节而变(但无年际变化)的强迫源(公式(2)~(3)中的 D_1 、 Q_1 、 T_{as} 、 E_s 、 P_r 以及 OGCM 计算区域外 AMIP SST 或陆表温度)作用下, 已进行了 26 年的数值积分计算, 本文给出最后 20 年模式平均气候态(即 20 年平均场及季节变化)模拟结果, 有关年际变化分析及敏感性试验将另文给出。

5.2 平均环流

图 2 给出大气模式模拟得到的热带太平洋表层风场和降水分布, 可见模式非常成功地再现了一些观测特征, 如赤道西太平洋弱小的西风区、太平洋地区宽广的信风区、ITCZ 和 SPCZ 及其相伴随的降水区等。模拟得到的热带太平洋海面起伏、表层洋流、SST 和表层盐度如图 3 所示。同样, 耦合模式刻划出观测到的热带太平洋环流基本特征, 如海面起伏图 3a 中, 副热带西太平洋沿岸地区的高水位区、纬圈方向西高东低分布和经圈方向槽脊结构(赤道槽、赤道脊、北赤道逆流槽和北赤道脊等); 表层流场图 3b 中, 热带表层流系(即南赤道洋流(SEC)、北赤道洋流(NEC)和介于这两者之间从西向东的北赤道逆流(NECC)等)及它们与海面起伏中槽脊分布间的对应关系; 海表温度图 3c 中, 赤道东太平洋为从秘鲁海岸沿赤道向西延伸的冷舌, 而西太平洋则为暖池等; 海表盐度图 3d 中, 副热带地区为高盐度区, 而热带辐合带及西太平洋地区为低盐度区等特征。模式不仅对海洋表层环流有如此逼真的数值再现, 而且对次表层温流场也有相当的模拟能力, 这在图 4 所示的赤道上平均纬圈洋流和温度的深度-纬圈剖面图中清楚可

1) The AMIP (Atmosphere Model Intercomparison Program) SST was kindly provided by Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI), Lawrence Livermore National Laboratory, USA

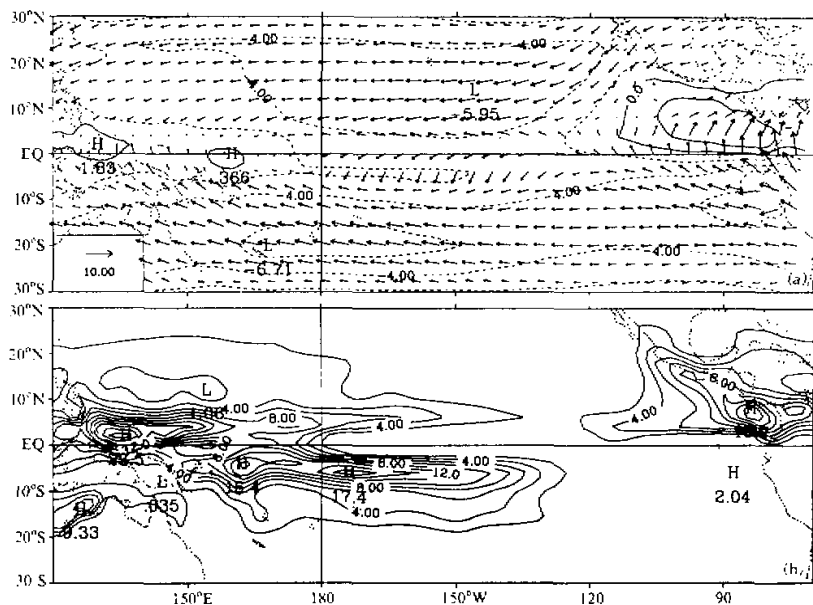


图 2 模拟得到的热带太平洋地区平均海表风场(矢量)及纬圈风速等值线(a)和降水(b)水平分布
风速等值线间隔为 2 m/s , 虚线为东风区; 降水等值线间隔为 2 mm/d

见, 如斜温层和赤道潜流(EUC)结构等。

5.3 季节变化

耦合模式得到的赤道上海表纬圈风速随季节变化如图 5 所示, 热带太平洋地区 3 月和 9 月海表风场水平分布如图 6 所示。可见, 赤道西风活动、信风强度变化及其南北半球间位向转换、ITCZ 和 SPCZ 及其相伴随的降水带(图略)随季节南北位移等观测特征有清楚的反映。图 7 给出了模拟得到的赤道上海表纬圈洋流和 SST 随季节变化。表层洋流变化最显著特征之一是 3~6 月间赤道东太平洋地区海表洋流流向逆转(即自西向东)和秋季 SEC 加强; 另外, 表层流水平分布(图略)表明, 北赤道逆流(NECC)在秋季从西太平洋一直跨越整个热带太平洋, 而在春季仅限于中、东太平洋地区。SST 季节变化(图 7b 和图 8)表明: 在春季, 赤道东太平洋和南美沿岸的冷水舌强度最弱, 那里的 SST 最高, 西太平洋暖池位于 $10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{S}$ 之间, 最暖区位于南太平洋; 随着从春到秋的季节转换, 这时西太平洋最暖区移至北太平洋, 赤道东太平洋和南美沿岸的冷水舌发展最盛, 那里的 SST 也最低。比较图 7a 和 7b 可见, 赤道东太平洋 SST 春季增暖和秋季冷却同那里的表层 SEC 春季逆转和秋季加强有关。

6 耦合模式性能评估

6.1 与观测资料间的比较

图 9 是观测到的平均热带太平洋海表大气风场(取自 ECWMF 整编的 1980 至 1989 平均)和 AMIP SST, 图 10 给出赤道上 AMIP SST 随季节变化。模式结果(图 2a、图 3c

和图 7b)与之极为相似,海气耦合模式能如此成功地模拟好观测到的热带太平洋大气和海洋平均环流及其季节变化确实尚不多见。当然,模式也存在一些误差,如中太平洋 10~20°N 间和南美沿岸地区信风强度偏弱,ITCZ 偏强,表层风场经圈分量偏弱,赤道斜温层和 EUC 强度偏弱等,这些有待于改进。

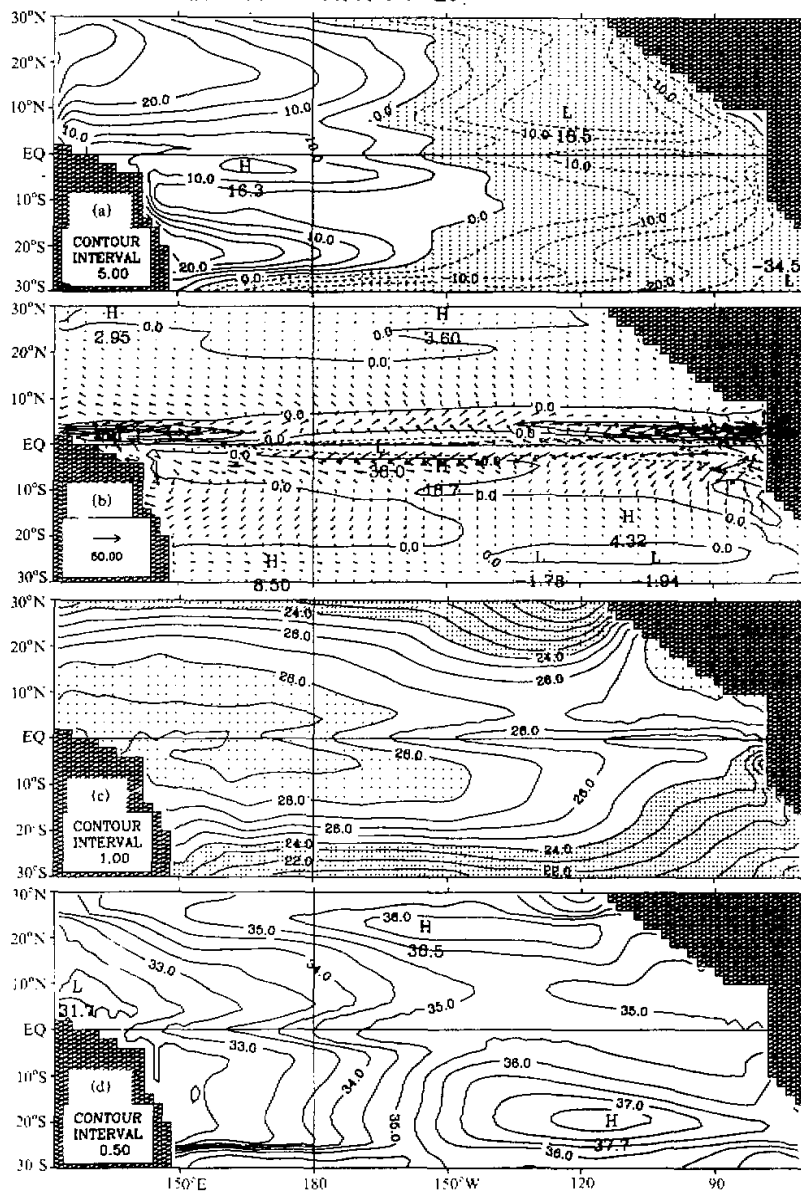


图 3 模拟得到的热带太平洋平均海面起伏(a, 等值线间隔为 5 cm, 虚线为负海面起伏)、海洋洋流矢量及纬圈洋流等值线(b, 等值线间隔为 20 cm/s, 虚线表示向西流)、海面温度(c, 等值线间隔为 1°C)和海面盐度(d, 等值线间隔为 0.5‰)

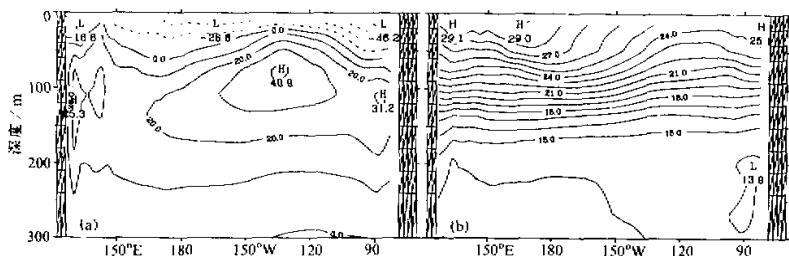


图4 模拟得到的赤道上海纬圈洋流(a, 等值线间隔为 10 cm/s , 虚线表示向西流)和温度(b, 等值线间隔为 1°C)的深度-纬圈剖面图

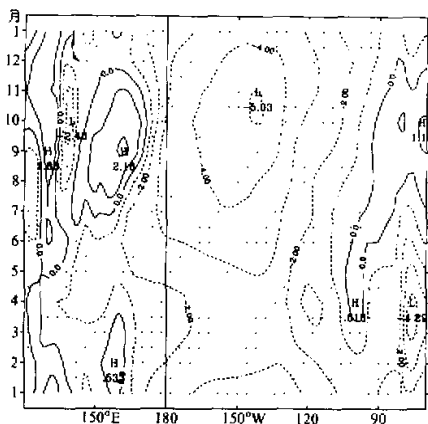


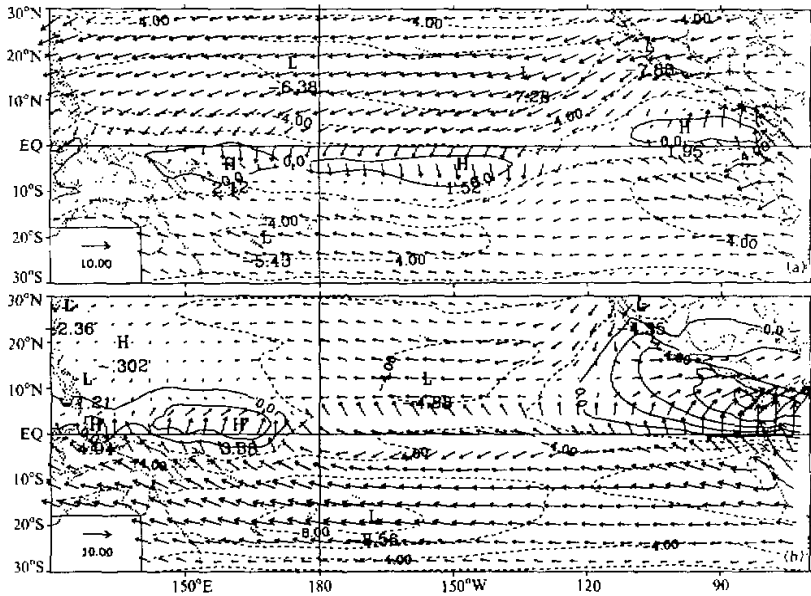
图5 模拟得到的赤道上海表纬圈风速随季节的变化。等值线间隔为 1 m/s , 虚线为东风区

6.2 与其他耦合模式间的初步比较

目前, 一些有代表性的海洋、大气耦合模式有: Cane-Zebiak 的中间型模式^[4], Neelin 的混合型模式^[5], 以及近年来发展较多的环流型模式(如 Philander 等^[6])。其中 Cane-Zebiak 的为距平模式(气候态是给定的); 一些环流型模式或者尚未考虑季节变化, 或者模式平均态及其季节变化与实际观测场差别较大(如海表风场太弱, 赤道东太平洋冷水舌区 SST 太高, 而东西向 SST 梯度很弱, 年际变率较弱, 甚至存在更为严重的所谓气候漂移), 仍需要改进和发展。混合型海气耦合模式(简单大

气和 OGCM 间的耦合)可集中间型和环流型耦合模式之优点并便于数值计算, 是研究和模拟热带海气相互作用较为理想的数值模型, Neelin 所发展的混合型海气耦合模式已在认识年际振荡机制等方面取得重大进展^[5]。

本工作所发展的 HCM 与 Neelin HCM 差别主要表现在: 第一, 大气和 OGCM 本身的构成不同。Neelin HCM 的大气部分是基于湿静力能量方程^[5], 海洋部分为 GFDL OGCM^[16]; 而本工作 HCM 的大气和海洋部分如本文第二节所述。第二是耦合方式不同, Neelin 采用单向通量修正技术, 海气耦合模式间变量交换(即耦合)频率为 15 天, 而我们的 HCM 未采用通量修正且可以是逐日同步进行的。第三是 Neelin 只考虑耦合系统中初始扰动是如何演变的, 未进行如季节变化等的数值模拟(因模式构成所限), 而本工作发展的 HCM 不仅模拟出极为真实的季节变化, 而且也模拟出年际变化(尽管年际振荡较弱)。考虑到耦合模式结果对模式构成、耦合方案、模式气候态等的强烈敏感性, 特别是我们所发展的 HCM 是有与 Neelin 模式显著不同的特点, 进行不同 HCM 及其耦合模式间的比较研究, 对于认识海气相互作用机理和模式与观测间、模式与模式间差别所在等都具有十分重要的意义, 具体比较试验结果将另文详述。



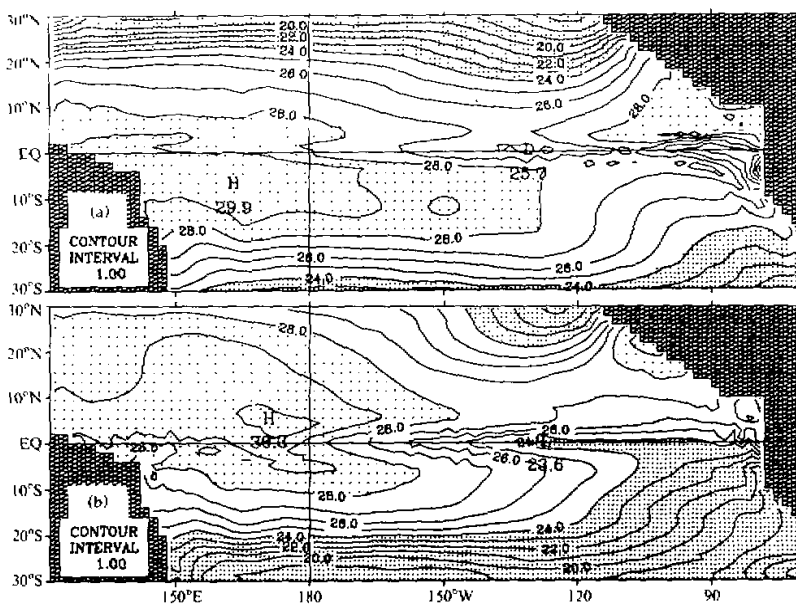


图 8 模拟得到的热带太平洋 3 月(a)和 9 月(b) SST 水平分布

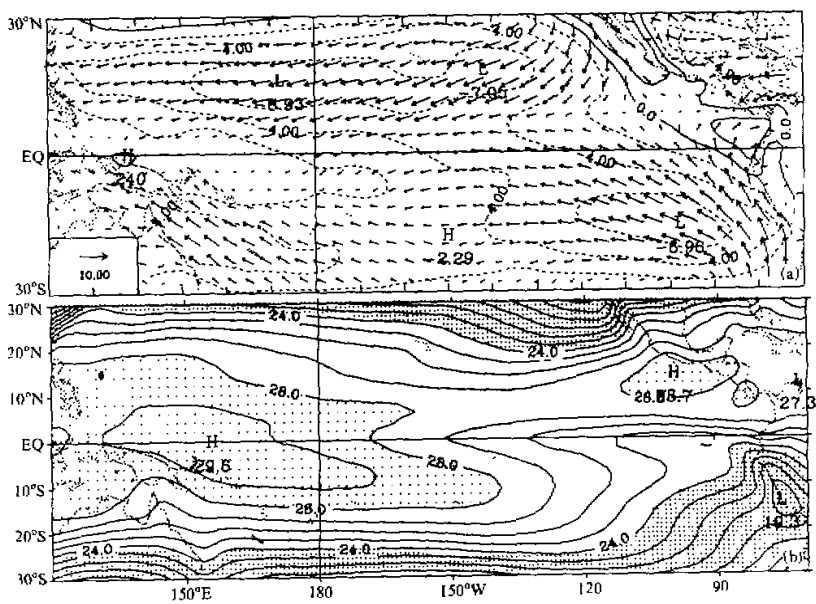


图 9 观测到的热带太平洋平均海表风场及纬向风速(a)和海表温度(b)的水平分布

如海气耦合方案、气候漂移产生机制、通量修正技术可行性评估、模式气候态与年际振荡间关系等等。本工作基于 Wang 和 Li 所发展的简单热带大气模式和大气物理研究所高分辨率的自由表面热带太平洋 OGCM, 设计了一个混合型热带海气耦合模式, 并采用逐日同步耦合方案, 未采用任何通量修正进行了 26 年数值积分, 结果表明, 这一 HCM 未出现气候漂移, 并且非常成功地再现了观测到的热带太平洋大气和海洋环流平均态及其季节变化, 令人鼓舞; 另一方面, 尽管年际振荡与模式气候态间关系尚不清楚, 但已有理论分析和数值试验表明, 耦合模式年际变率特性与其气候态密切相关, 较小的气候态差异可导致完全不同的年际振荡行为特征, 能真实地模拟好观测到的气候态无疑将为进一步研究和模拟年际气候异常奠定可靠的基础。同时, 本工作所发展的 HCM 较国际上发展的耦合模式有明显不同之处, 可望在日益受到学术界高度重视的耦合模式比较研究工作中发挥作用。有关此模式对热带海气系统年际振荡模拟、各种敏感性试验及 El Niño 事件可预报性, 与其他耦合模式间比较等研究将另文给出。

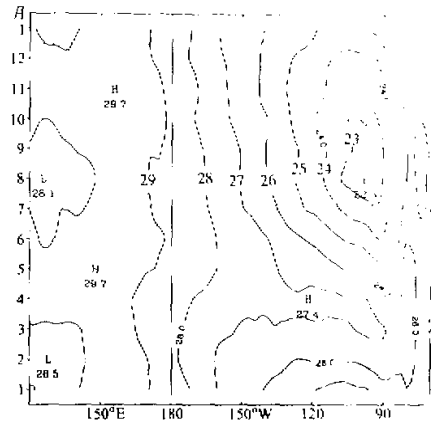


图 10 观测到的赤道上海表温度随季节的变化

致谢: 美国夏威夷大学王斌教授提供本工作中的简单热带大气模式; 工作过程中得到吴国雄、张学洪、袁重光、李崇银、王会军等同志的热情帮助和有益的讨论, 得到国家海洋环境预报研究中心王彰贵博士的大力协助, 作者在此谨表谢意。

参 考 文 献

- 1 Bjerknes, J., 1969, Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 163~172.
- 2 McCreary, J. P., and D.L.T. Anderson, 1991, An overview of coupled ocean-atmosphere models of El Niño and Southern Oscillation, *J. Geophys. Res.*, **96**, 3125~3150.
- 3 Hirst, A. C., 1985, Free equatorial instabilities in simple coupled atmosphere-ocean models, In: J. Nihoul (Editor), *Coupled Ocean-Atmospheric Models*, Elsevier, Amsterdam, 153~165.
- 4 Cane, M. A. and S. E. Zebiak, 1985, A theory for El Niño and the southern oscillation, *Science*, **228**, 1084~1087.
- 5 Neelin, J. D., 1990, A hybrid coupled general circulation model for El Niño studies, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 674~693.
- 6 Philander, S. G. H., Lau, N.-C., R. C. Pacanowski, and M. J. Nath, 1992, Simulation of ENSO with a global atmospheric GCM coupled to a high-resolution, tropical Pacific Ocean GCM, *J. Climate*, **5**, 308~329.
- 7 Neelin, J. P., M. Latif et al., 1992, Tropical air-sea interaction in general circulation models, *Climate Dynamics*, **7**, 73~104.
- 8 Wang, B., and T.-M. Li, 1993, A simple tropical atmospheric model of relevance to short-term climate variations, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 260~284.
- 9 Zhang, R.-H. and M. Endoh, 1992, A free surface general circulation model for the tropical Pacific, *J. Geophys.*

- Res., **97**, 11237~11255
- 10 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 组, 第 2 期, 204~210
 - 11 Matsuno, T., 1966, Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, *J. Meteor. Soc. Japan*, **44**, 25~43.
 - 12 Gill, A. E., 1980, Some simple solutions for heat induced tropical circulation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447~462.
 - 13 Lindzen, R. S., and S. Nigam, 1987, On the role of sea surface temperature gradients in forcing low level winds and convergence in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2440~2458.
 - 14 Zeng Qingcun, 1983, Some numerical ocean-atmospheric coupling models. Paper presented at the First International Symposium Integrated Global Ocean Monitoring, Tallinn, Estonia, Oct. 2~10.
 - 15 张荣华, 曾庆存, 张学洪, 1991, 太平洋大尺度环流数值模拟, 1: 数学模式及其性能, 大气科学, **15**(4), 1~16.
 - 16 Bryan, K., 1969, A numerical methods for the study of the circulation of the world ocean, *J. Comput. Phys.*, **4**, 347~376.
 - 17 Latif, M., J. Biercamp, and H. von Storch, 1987, The response of a coupled ocean-atmosphere general circulation model to wind bursts, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 964~979.
 - 18 曾庆存, 袁秉光, 王万秋, 张荣华, 1990, 跨季度气候距平数值预测试验, 大气科学, **14**(1), 10~25.
 - 19 Zhang Xuehong, Bao Ning, Yu Rucong and Wang Wanqiu, 1992, Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM, *Chinese J. Atmos. Sci.*, **16**, 129~144.
 - 20 Zhang, R.-H. and M. Endoh, 1994, Simulation of the 1986~1987 El Niño and 1988 La Niña events with a free surface tropical Pacific OGCM, *J. Geophys. Res.*, **99c4**, 7743~7759.

A Hybrid Coupled Tropical Atmosphere-Ocean Model Part I: Model Formulation and Simulated Tropical Pacific Climatology

Zhang Ronghua, Zeng Qingcun and Zhou Guangqing

(LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract A hybrid coupled tropical atmosphere-ocean model (HCM) is developed to study the tropical air-sea interactions and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) cycles. The atmospheric component is a simple tropical model consisting of a well-mixed planetary boundary layer (Lindzen-Nigam model) and a free troposphere represented by the first order baroclinic mode (Gill type model) in the tropical Pacific between 30°N and 30°S with a horizontal resolution of 2°. The oceanic component is the 1AP free surface tropical Pacific OGCM between 30°N and 30°S with horizontal grid spacing of 1° in latitude and 2° in longitude, and with 14 vertical layers. The coupled model can produce both the climatology (annual mean and seasonal cycle) and short-term climate variations. The coupling procedure consists of exchanging the surface fluxes, i.e., the surface wind stress estimated from the simple atmosphere together with the calculated heat flux by Haney relaxation formula and the prescribed water flux are used to force OGCM, where as OGCM calculates sea surface temperature (SST) within the domain and uses the observed surface temperature outside the domain, which gives the surface boundary condition for the atmospheric model. Numerical results with synchronous daily coupling without flux correction are presented in this paper for simulations of the tropical Pacific climatology. It is shown that the coupled model is free from the climate drift and is able to accurately reproduce the observed tropical Pacific climatology of the atmosphere and ocean, in particular the sea surface wind field and related tropical convergence zone (ITCZ and SPCZ) and precipitation, SST, and their seasonal variations. The model performance is further examined by intercomparing the present model results with others and with the corresponding observations.

Key words simple tropical atmosphere oceanic general circulation model (OGCM)
coupling simulated climatology of the tropical atmosphere and ocean