

# 热带太平洋和印度洋海面高度季节循环和 年际变化的数值模拟<sup>\*</sup>

李雁领<sup>\*\*1)</sup> 俞永强<sup>1)</sup> 张学洪<sup>1)</sup> 肖稳安<sup>2)</sup>

1) (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 100029)

2) (南京气象学院, 南京 210044)

**摘 要** 利用卫星海面高度计资料, 分析了赤道太平洋和印度洋海面高度变化的季节和年际变化特征, 并与一个耦合气候系统模式 FGCM0 模拟的海面高度进行比较, 评估模式模拟海面高度季节和年际变化的能力。结果表明, 尽管耦合模式存在一定的系统误差, 但仍然能在相当程度上模拟出海面高度季节和年际变化的基本特征。同时为检验模式中印度尼西亚贯穿流 (ITF) 对海面高度季节和年际变化的影响, 还进行了印度尼西亚海道完全关闭的敏感性试验, 与控制试验结果对比表明, 印度尼西亚贯穿流可以显著影响热带太平洋和印度洋年际变化的特征。

**关键词:** 海面高度; 耦合模式; 印度尼西亚贯穿流

**文章编号** 1006-9895 (2004) 04-0493-17 **中图分类号** P732 **文献标识码** A

## 1 引言

随着气候模式特别是耦合气候系统模式在气候研究中的应用越来越广泛, 气候模式的评估也越来越引起人们的重视, 因为模式评估是发展和改进耦合气候系统模式的重要手段<sup>[1,2]</sup>。特别是在目前耦合气候系统模式的发展还处在十分初级的阶段, 模式的能力还十分有限, 对模式能力的评估就显得尤为重要。模式评估需要大量的第一手观测资料, 但由于在海洋上的观测资料无论是在空间范围还是在时间范围上都十分稀少, 因此细致地评估目前耦合模式对海洋环流的模拟能力还显得有些困难。所幸的是, 卫星遥感技术在最近一二十年里发展极其迅速, 卫星遥感资料已经在海洋和大气科学中开始了广泛应用。由于卫星遥感反演资料具有较高的空间和时间分辨率, 它们不仅在中短期天气预报中起到了不可替代的作用, 而且在气候模式资料同化和模式检验的作用也变得越来越重要了。目前, 卫星海面高度计资料是比较成熟、且应用比较广泛的卫星遥感资料之一, 具有较高的时间和空间分辨率, 可以更好地反映海洋中的波动作用, 已经成为目前监测 ENSO 事件的重要手段之一。这是由于海面高度尽管反映的是海平面的几何高度, 但却可以体现海洋温跃层厚度的变化。因此, 本文拟利用观测的

2003-04-09 收到, 2003-11-17 收到修改稿

<sup>\*</sup> 中国科学院知识创新项目 ZKXC2-SW-210, 国家自然科学基金资助项目 40231004、40221503 和国家重点基础研究发展规划项目 G200078502 共同资助

<sup>\*\*</sup> 目前地址: 美国夏威夷大学气象系

卫星海面高度计资料, 首先分析赤道太平洋和印度洋海面高度的季节变化和年际变化特征, 同时对比分析一个耦合气候系统模式 FGCM0 输出的海面高度资料, 检验该模式重现赤道太平洋和印度洋海面高度季节和年际变化的能力。

在热带海气相互作用的研究中, 太平洋和印度洋的海洋和大气环流之间的相互关系一直是人们关注的研究对象之一。许多观测事实揭示, 在赤道太平洋和印度洋的大气和海洋环流之间存在密切的关系, 在一定的条件下甚至可以相互影响。例如, Villwock 和 Latif<sup>[3]</sup> 以及 Tourre 和 White<sup>[4,5]</sup> 分别分析了印度洋和西太平洋地区的海面温度 (SST)、上层海洋热容量以及表面风应力的特征, 证明它们主要表现为 ENSO 的特征。最近, 关于印度洋偶极子的研究也非常多, 有些作者也认为印度洋偶极子和赤道太平洋 ENSO 之间关系密切, 同时也有一些与之不同的观点<sup>[6~8]</sup>。赤道印度洋和太平洋之间的相互作用, 可能有两种途径, 其一是通过大气中的 Walker 环流, 其二是通过海洋中的印度尼西亚贯穿流。关于前者, 已经有一些研究结果。例如, 吴国雄和孟文<sup>[9]</sup> 发现, 在 20 世纪 80 年代以后的几次 ENSO 事件, 年际异常的信号都是最早出现在赤道印度洋上, 然后再从印度洋逐渐向赤道太平洋传播。关于印度尼西亚贯穿流在气候系统中的作用和意义, 目前已有的大多数研究工作主要集中在讨论印度尼西亚贯穿流对平均气候状态的影响<sup>[10,11]</sup>, 这些研究工作认为印度尼西亚海道的关闭可以导致赤道太平洋增温和赤道印度洋降温。关于印度尼西亚贯穿流的季节和年际变化研究, 目前还主要限制在单独的海洋模式<sup>[12]</sup>, 讨论其变化的物理机制。为了检验在耦合模式 FGCM0 中印度尼西亚贯穿流对热带海洋环流季节和年际变化的影响, 本文进行了一个极端的敏感性试验, 即改变了耦合模式中的海陆分布, 将连接太平洋和印度洋的印度尼西亚海道完全关闭, 进行敏感性试验, 通过与控制试验的比较讨论印度尼西亚贯穿流对热带海洋和大气环流的作用。

## 2 模式和资料介绍

### 2.1 耦合模式及其实验方案

本文使用的海气耦合模式是俞永强等<sup>[13]</sup>发展的一个“灵活的”海气耦合环流模式 (Flexible Coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Model) 的原始版本, 简称为 FGCM0。它是基于 NCAR CSM-1 (the NCAR Climate System Model, Version One)<sup>[14]</sup> 发展起来的, 具体做法是借助于耦合器 (flux coupler), 将 CSM-1 原有的海洋分模式替换为金向泽等发展的全球海洋环流模式 L30T63<sup>[15]</sup>, 其他部分基本不变, 但暂时关闭了淡水通量的耦合, 而代之以海表盐度的恢复性边界条件。尽管耦合模式 FGCM0 存在着与其他没有通量调整耦合模式类似的缺点, 如双赤道辐合带现象等, 但它基本上能够模拟热带海洋和大气环流的基本特征, 特别是赤道太平洋的 ENSO 与赤道印度洋的偶极子现象<sup>[13,16]</sup>。FGCM0 的海洋分量模式 L30T63 是一个 30 层全球模式, 它的水平格点分布和三角形截断 63 波的大气谱模式相同, 水平格距约为  $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 。L30T63 采用了沿着等密度面混合的“GM90”方案<sup>[17]</sup>, 并在热带上层海洋采用了依赖于 Richardson 数的垂直混合方案<sup>[18]</sup>。文献 [19] 给出了 L30T63 的一个 1160 年的基本试验结果, 模拟的热盐环流和风生环流合理, 恒定温跃层较先前有显著改进。同时, 单独的

海洋模式在给定的观测法应力强迫下, 能够较好地模拟赤道太平洋的年际变化特征<sup>[20]</sup>。

目前, FGCM0 已经成功积分了 60 年, 虽然模式的性能并不能让人完全满意, 但仍能够在相当程度上成功地模拟出全球气候的基本特征<sup>[16,21,22]</sup>。本文主要分析第 10 至 25 模式年耦合模式逐日输出的海平面高度, 并与卫星观测的海表高度异常进行对比分析, 着重讨论热带太平洋和印度洋季节循环和年际变化的特征。为方便起见, 本文将卫星海面高度资料记为 SSH, 耦合模式 FGCM0 模拟的海表高度记为 Z0。同时, 为了检验印度尼西亚贯穿流 (ITF) 对热带海洋和大气环流季节变化及其年际变化的影响, 我们还把模式中的印度尼西亚海道完全关闭, 进行了 25 年敏感性试验, 其模拟的海面高度记为 Z1。

## 2.2 卫星反演的海面高度资料

本文使用的海表高度是全球范围的每隔 10 天观测一次的海表高度异常的格点数据, 取自 AVISO/Altimetry (Archiving, Validation and Interpretation of Satellites Oceanographic data) 提供的 MSLA (Maps of Sea Level Anomaly Altimeter Data Products)<sup>[23]</sup>, 它综合处理了 TOPEX/Poseidon 和 ERS-1/2 的海表高度数据, 空间分辨率  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。本文选用的数据是从 1992 年 10 月 22 日至 2000 年 1 月 14 日, ( $40^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$ ,  $30^\circ\text{E} \sim 75^\circ\text{W}$ ) 的数据, 并做了  $1^\circ \times 1^\circ$  范围内平均。数据精度完全能满足分析要求, 较短的时间长度也基本能满足对比试验的要求。其中, TOPEX/POSEIDON 系美法两国联合研制的以研究海洋环流在全球气候中的作用为主要目的极轨卫星, 发射于 1992 年, 轨道高度 1336 km, 轨道倾角 66 度, 轨道周期 10 d, 测量最大均方根误差 2 cm。ERS-1 和 ERS-2 则属于欧洲航天局, 分别发射于 1991 年和 1995 年, 两星均有星载高度计, 精度不及 TOPEX/POSEIDON 高, 但其数据经处理后可达到与 TOPEX/POSEIDON 相同的精度。

# 3 研究方法

## 3.1 滤波处理

为研究海表高度的季节循环和年际变化, 本文首先对模拟和观测的海面高度数据分别进行了 3 到 15 个月的带通滤波和 18 个月的低通滤波。滤波过程的数学基础是卷积, 数字滤波器的输入  $x(n)$  的 Z 变换形式  $X(z)$  于输出  $y(n)$  的 Z 变换形式  $Y(z)$  之间的关系如下:  $Y(z) = H(z)X(z)$ 。本文采用 Butterworth 滤波器传递函数<sup>[24]</sup>, 其频域表达式形式如下:

$$H(i\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}}$$

其中,  $\omega$  是频率、 $\omega_c$  是截止频率、 $n$  是滤波器阶数。

## 3.2 复经验正交函数分析 (CEOF)

主分量分析 (EOF) 也即经验正交函数分解, 通过计算经过滤波和标准化处理的时空场相关系数矩阵的特征向量  $R_{cc} \times E = E \times \Lambda$  把随时间变化的气象要素分解为空间函数  $E$  和时间函数部分  $A = E' \times X$ 。空间函数部分概括场的地域分布特点, 这部分不随

时间变化；而时间函数部分则有空间点（变量）的线性组合所构成，成为主分量，这些主分量的头几个占有原空间点（变量）的总方差的很大部分。研究主分量随时间变化的规律就可以代替对原场随时间变化的研究。复主分量分析（CEOF）又称 Hilbert 主分量分析。其基本原理和主分量分析方法相似，差别在于分析过程中人为加入了解析信号作为虚部构成复数时序信号  $C(z) = X(z) + iY(z)$  解析信号是原时序信号的 Hilbert 变换，它们的相位相差  $\pi/2$ ，振幅相同。这样，复主分量分析就不仅能辨别主分量的时空分布特征，而且能获得空间函数的振幅和相位  $E_{m,k} = B_{m,k} e^{i\Theta_{m,k}}$  和时间函数的振幅和相位  $A_k(n) = D_k(n) e^{i\Psi_k(n)}$ ，其中， $B_{m,k}$  是最大振幅的空间分布， $\Theta_{m,k}$  是振动的相位分布特征， $B_{m,k} \times \cos(\Theta_{m,k})$  就是振幅的空间分布，这里可以找到最大正振幅区域和最大负振幅区域，这样便有效地展示时间序列在空间上和时间上的传播特征。空间函数和时间函数的实部是我们需要获得的信号，时间函数表现的是空间函数的随时间的变化特性，我们将计算出的空间函数的振幅和相位分别赋予时间函数的变化特征再求出实部就得到了滤除了噪声的时序信号，这一过程的数学表达式是  $c_m(n) = \sum_{k=1}^H E_{m,k} \times A_k(n)$ 。我们可以取前几个主分量或是某个主分量（通常是第一主分量）。关于复主分量分析的详细介绍参见文献 [25]。

## 4 海面高度的季节变化

利用前面描述的滤波和复 EOF 分析方法，先对观测和模拟的海面高度进行 3~15 个月的带通滤波之后再复 EOF 分析。结果表明，无论是观测和模拟的海面高度的第一个复特征向量，都反映了 1 年周期的季节变化，而第二特征向量则反映了半年周期的变化。

图 1 是由第一复特征向量重建的海面高度在赤道上的传播特征，主要是反映 1 年周期的变化情况。在赤道印度洋，观测的海面高度在赤道上主要体现为东传的特征，即由印度洋赤道上自西向东传播；但在中东太平洋，观测的海面高度则表现为西传的特征。耦合模式控制试验模拟的海面高度 Z0 在赤道印度洋也显示出同观测类似的东传特征，但在赤道太平洋模拟的海面高度却表现为与观测相反的传播特征，即从西太平洋向东太平洋传播，并且海面高度距平的传播似乎并没有受到印度尼西亚群岛的阻隔，直接由印度洋向太平洋传播。但赤道西太平洋年变化的传播特征有较大的误差，这与模式本身的双赤道辐射带有关。尽管在敏感性试验中，印度尼西亚海道被人为地关闭了，但是在 1 年周期上，模式模拟出的海面高度 Z1 变化的信号仍同控制试验一样表现为从赤道印度洋向太平洋传播的特征。这表明在赤道上模拟的季节变化信号的传播主要是由风应力强迫决定的，而不是由海洋内部的波动过程决定的。

图 2 是由第一复特征向量重建的海面高度在  $10^\circ\text{S}$  附近传播的特征。从图 2 可见，模拟的海平面高度异常年周期变化的特征是在  $10^\circ\text{S}$  左右都是从赤道东太平洋向西太平洋传播，西传波动在两个大洋上都与 SSH 吻合得很好。实际上，在  $10^\circ\text{N}$  左右也有类似的传播特征（图略）。

图 3 和图 4 是观测和模拟的海面高度的第二特征向量，它们都反映了海面高度半

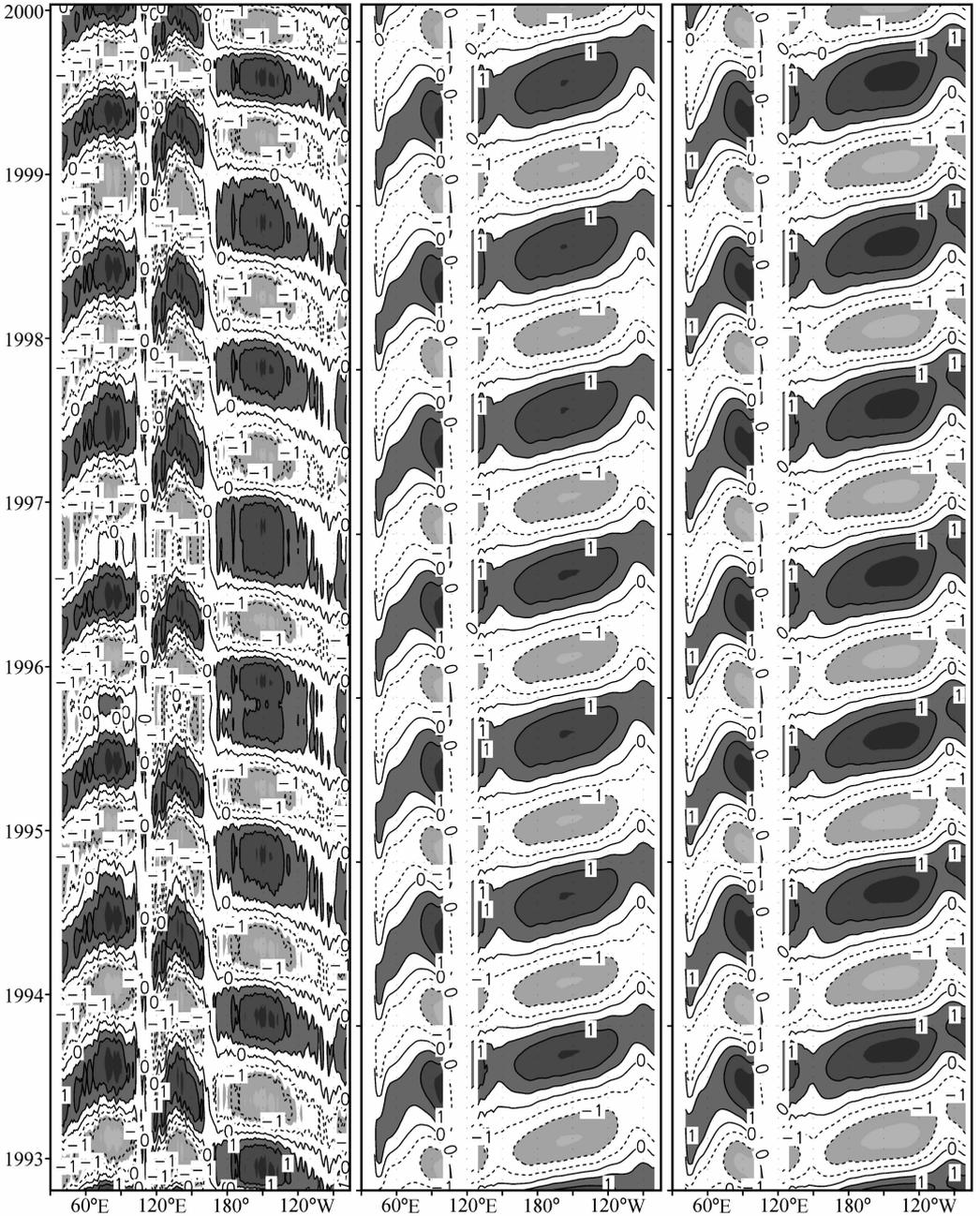


图1 由CEOF分析重建的海面高度在 $2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$ 平均的年变化特征  
左：观测的海面高度；中：模拟的海面高度 $Z_0$ ；右：模拟的海面高度 $Z_1$

年变化的特征。在赤道太平洋，以日界线为界，在日界线以西观测的海面高度距平主要以东传为主，在日界线以东观测的海面高度距平主要以西传为主，但是耦合模式控制试验和敏感性试验模拟的海面高度 $Z_0$ 和 $Z_1$ 在赤道太平洋都只反映出东传的特征（图3）。在赤道外，观测和模拟的结果相当接近，都主要反映海面高度距平自东太平洋向西太

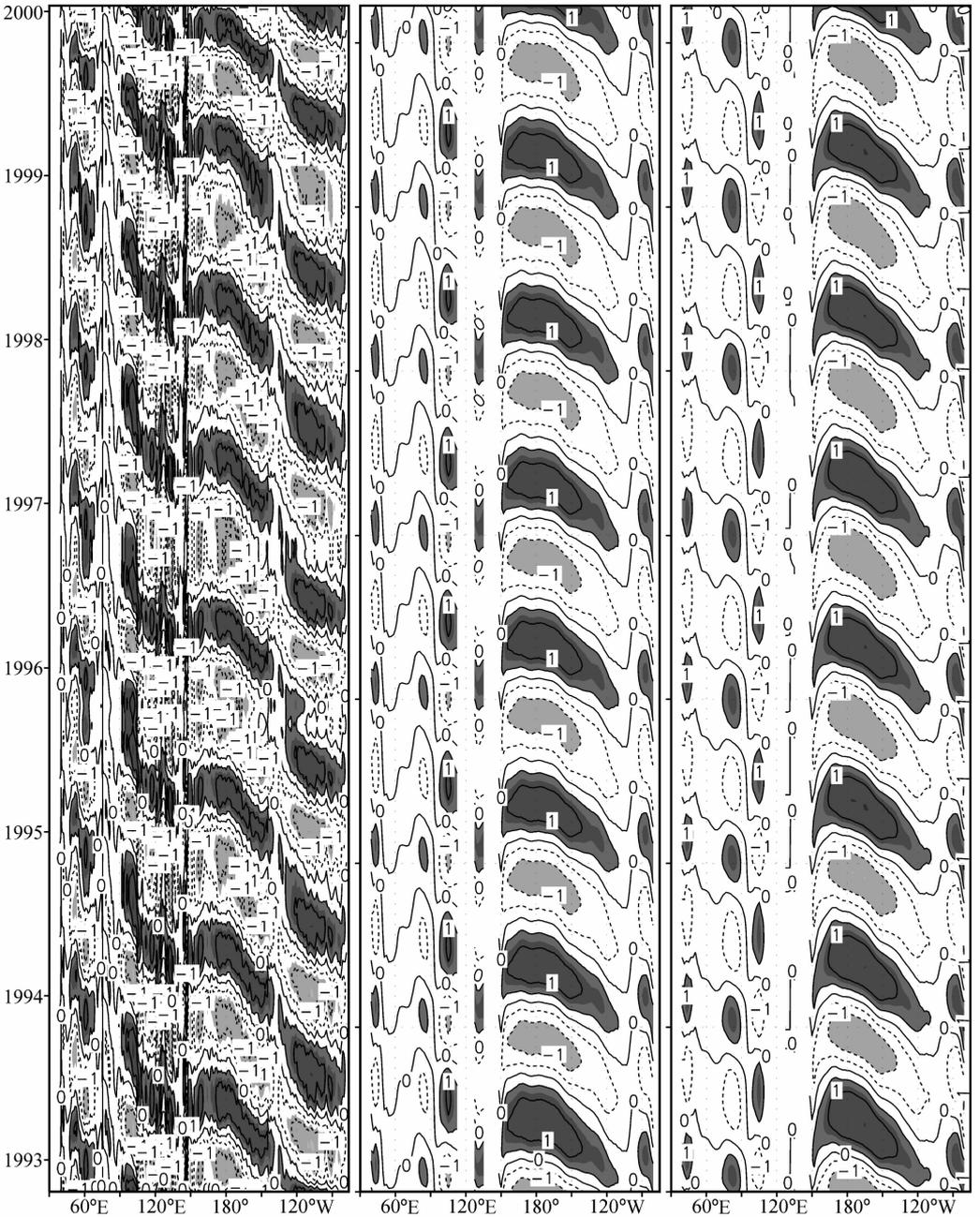


图 2 由 CEOF 分析重建的海面高度在  $8^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{S}$  平均年变化特征  
左: 观测的海面高度; 中: 模拟的海面高度  $Z_0$ ; 右: 模拟的海面高度  $Z_1$

平洋的传播过程。

总体看来, 在热带太平洋和印度洋观测的季节循环 (包括 1 年周期和半年周期) 与模式结果在许多方面比较接近; 但在赤道上, 模拟的季节变化只能反映出海面高度距平东传的特征, 而观测的海面高度距平既有东传也有西传的特征。Davey 等<sup>[26]</sup> 在对

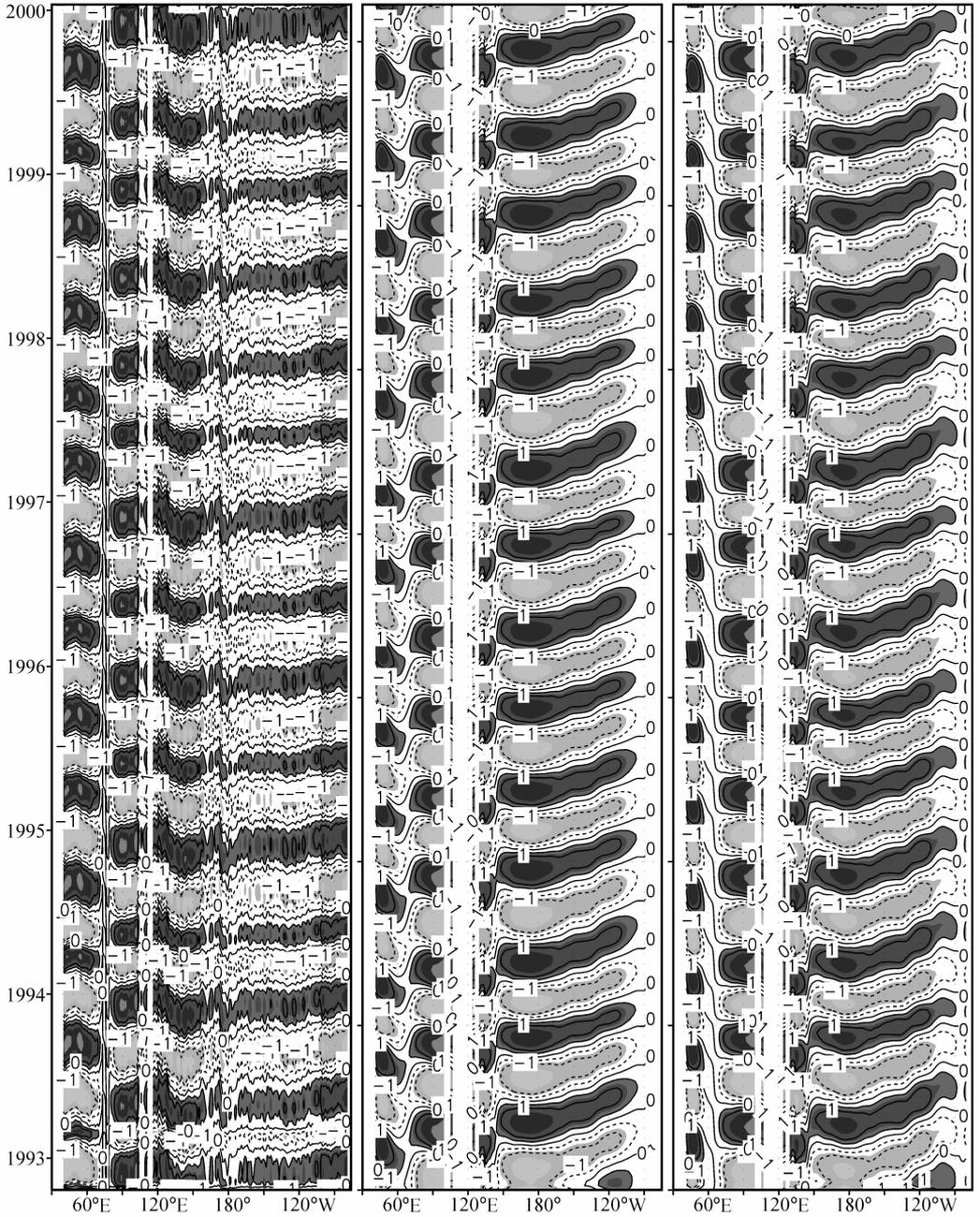


图 3 由 CEOF 分析重建的海面高度在 2°S~2°N 平均的半年变化特征

左：观测的海面高度；中：模拟的海面高度 Z<sub>0</sub>；右：模拟的海面高度 Z<sub>1</sub>

比分析 15 个直接耦合模式模拟的上层 300~400 m 海洋热含量的季节变化时指出，在赤道太平洋观测的年循环以西传为主，但是在 15 个直接耦合模式中只有 2 个耦合模式模拟出类似的西传特征。这实际上是目前绝大多数耦合模式共同的缺陷，值得进一步研究。由于上层海洋热含量的空间分布形式和传播特征基本上与海面高度一致，因此，

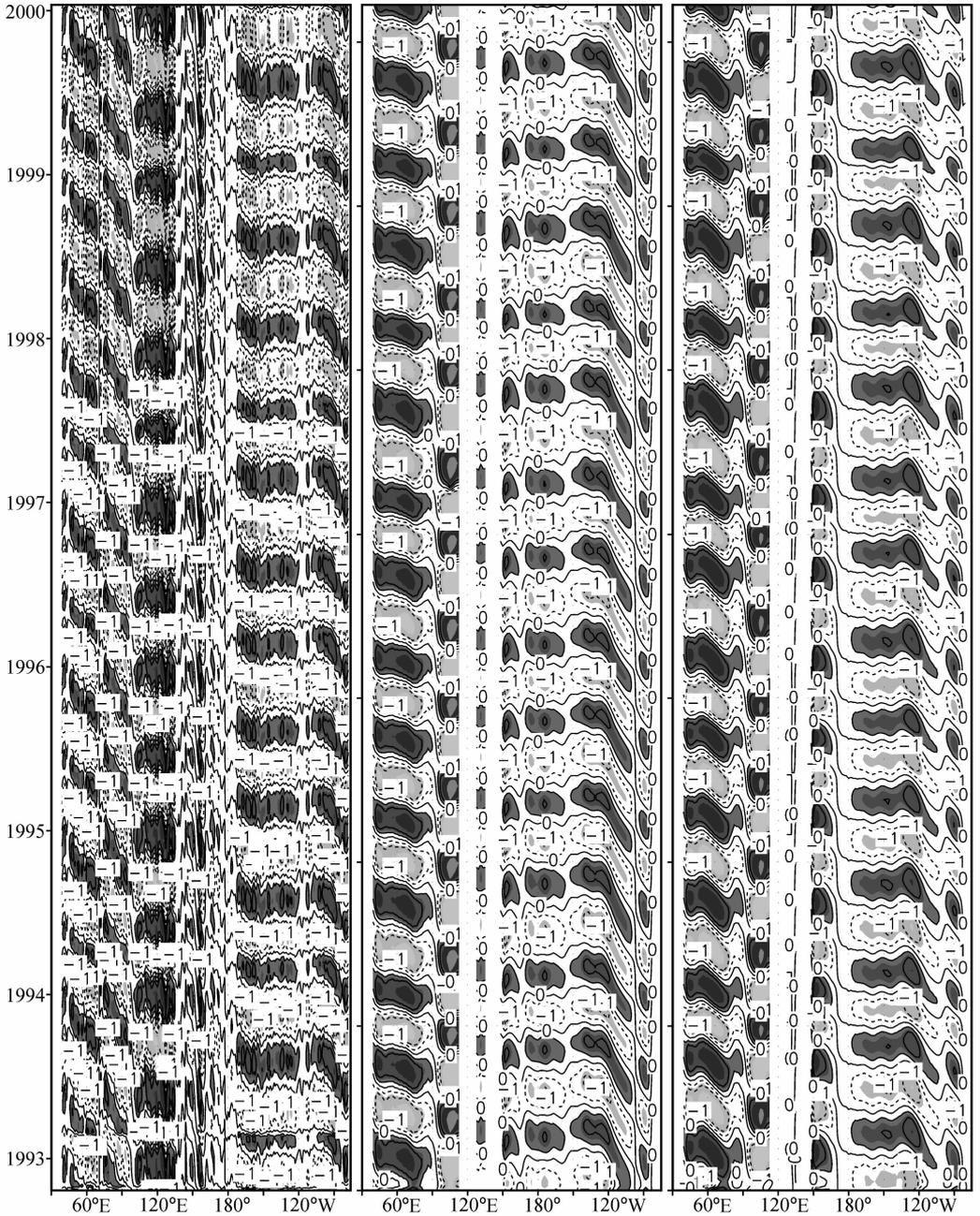


图4 由CEOF分析重建的海面高度在 $8^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{S}$ 平均的半年变化特征  
左: 观测的海面高度; 中: 模拟的海面高度 $Z_0$ ; 右: 模拟的海面高度 $Z_1$

目前大多数耦合模式模拟的在赤道太平洋的季节变化特征也与FGCM0类似。对比控制试验和印度尼西亚海道关闭的敏感性试验模拟的海面高度 $Z_0$ 和 $Z_1$ , 它们的振幅分布结构以及振动幅值、周期变化、相位传播特征都没有显著差异。总体上, 关闭了印度尼西亚海道之后, 模拟的热带太平洋和印度洋海面高度的季节循环没有出现本质的变化。

## 5 海面高度的年际变化

与上一节的分析类似，为了研究海面高度 SSH 的年际变化，首先对观测和模式资料都进行了低通滤波，只保留了年际以上时间尺度的变化，然后再进行 CEOF 分析。观测的海面高度 SSH 第一特征向量解释了总方差的 60.8%，图 5 给出了第一特征向量在不同位相时的空间特征，其中的位相间隔为  $\pi/4$ 。第一特征向量对应的时间周期大约是 3~4 年（图略），主要反映了海面高度在 ENSO 循环中的基本特征。可以看出，SSH 第一主分量三个明显的最大振幅区域：一个位于赤道附近  $130^{\circ}\text{E}$  附近的东太平洋上，一个位于赤道外  $10^{\circ}\text{N}$  和  $10^{\circ}\text{S}$  附近的西太平洋上，另外一个位于印度洋 ( $70^{\circ}\text{W}$ ,  $10^{\circ}\text{S}$ ) 附近。在太平洋区域，海面高度在赤道上自西太平洋向东传播，在赤道外  $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$  则由东太平洋向西太平洋传播，并且在赤道上和赤道外海面高度距平符号恰好相反，这样就构成了一个闭合的循环。实际上，海面高度的年际变化主要是由温跃层厚度的变化，也就是上层海洋热含量的变化造成的，海面高度在赤道上的东传特征是反映了赤道 Kelvin 波的运动，而在赤道外西传波动则是 Rossby 波的结果。尽管受资料长度的限制，CEOF 分析结果还存在不确定性，但总体看来，热带太平洋年际变化信号传播的特征与所谓的“延迟振子 (Delayed Oscillator)”理论给出的模型十分类似<sup>[27,28]</sup>，即 El Niño 早期信号最先出现在赤道西太平洋，表现为温跃层加深，海平面高度增加，然后温跃层和海面高度的扰动以 Kelvin 波的形式在赤道上向东传播，并在传播的过程中逐渐加强，当扰动到达东太平洋时，强度达到最大，此时表面的海温距平也达到极值，El Niño 事件完全成熟；在 El Niño 事件发展的同时，在赤道外  $5\sim 10^{\circ}\text{N}$  和  $5\sim 10^{\circ}\text{S}$  各有一支 Rossby 波将温跃层和海面高度的负距平由东太平洋向西传播，到达西边界再反射成为 Kelvin 波向东传播，从而使得 El Niño 事件结束。

同时，还需要注意的是在印度洋海面高度年际变化信号与热带太平洋有相当好的相关关系，即赤道东印度洋海面高度的距平符号与赤道西太平洋相同，而赤道西印度洋的距平符号则与之相反，并且赤道印度洋的信号要略早于太平洋。因此，在赤道印度洋，海面高度距平呈现出东西反向的偶极子形状，实际上这种空间形式不仅表现在海面高度上，而且在海表温度和次表层温度上都有体现，这就是所谓的赤道印度洋偶极子现象<sup>[6,7,8]</sup>。

同观测结果类似，在年际时间尺度上，模式模拟的海平面高度距平  $Z_0$  的空间分布也体现了 ENSO 特征（图 6），主要的海面高度距平在赤道上从印度洋向东太平洋传播，然后再从东太平洋沿  $5\sim 10^{\circ}\text{N}$  向西太平洋传播，其特征与所谓的“延迟振子 (Delayed Oscillator)”理论模型相当接近。但是需要指出的是，模式模拟的 ENSO 特征在许多方面与观测不同。首先，模拟的海面高度距平基本上局限于  $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$  之间，并且主要的异常中心并不像观测一样恰好位于赤道上，而是在赤道南北两侧各有有一个对称的大值中心，并且异常值中心位置明显偏西，这可能与模式模拟的平均气候状态的偏差有关。与大多数直接耦合模式一样，FGCM0 在赤道地区的主要模拟误差是“双赤道辐合带 (Double ITCZ)”现象，即赤道冷舌西伸过于强烈，使得西太平洋暖池主体被分为关于赤道大体上对称的两部分，这也是大多数耦合模式的通病<sup>[29]</sup>。赤道冷舌位置偏

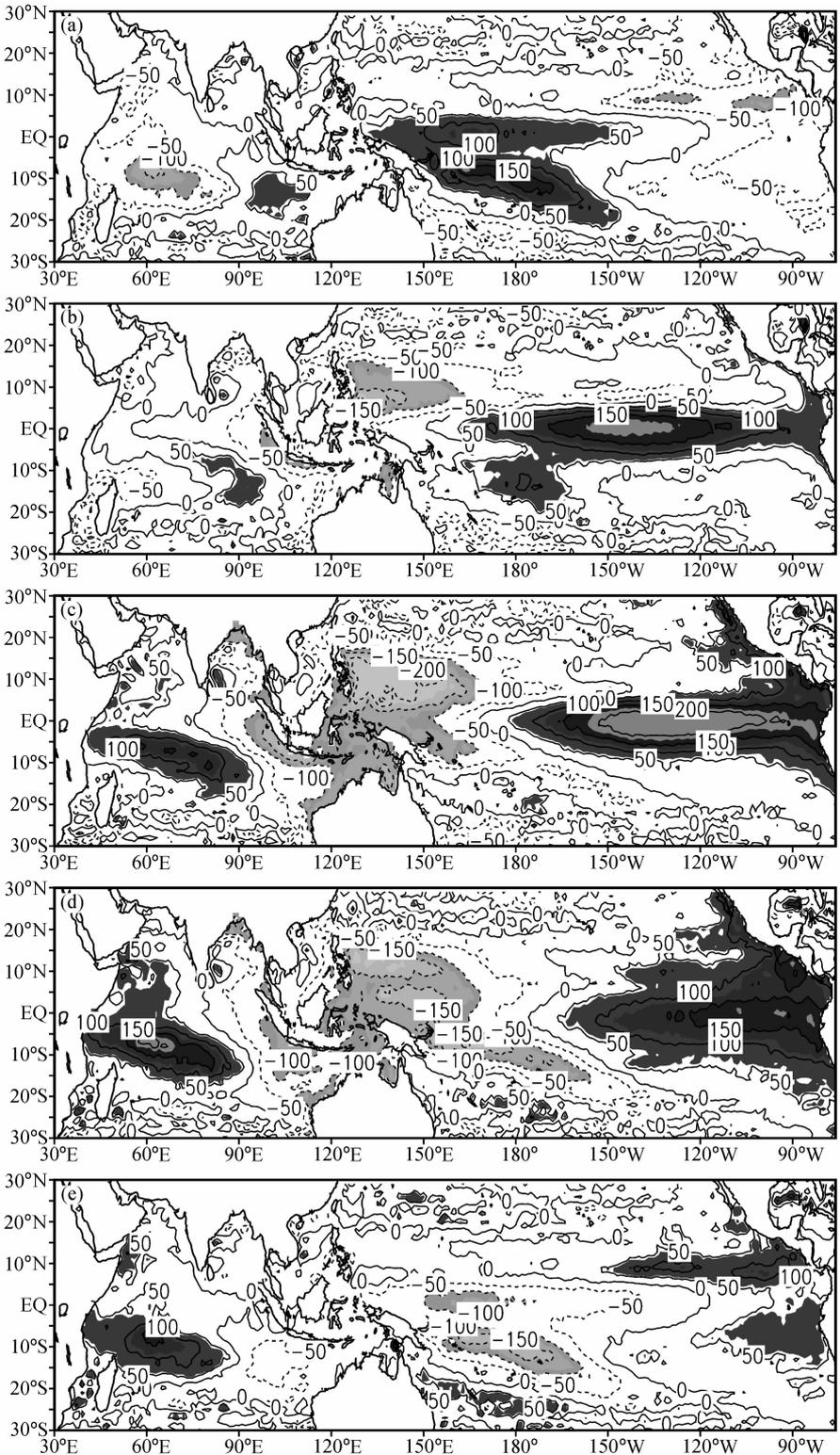


图5 低通滤波后的 TOPEX 海面高度 CEOF 第一特征向量的空间分布  
(a) 0°位相; (b) 45°位相; (c) 90°位相; (d) 135°位相; (e) 180°位相

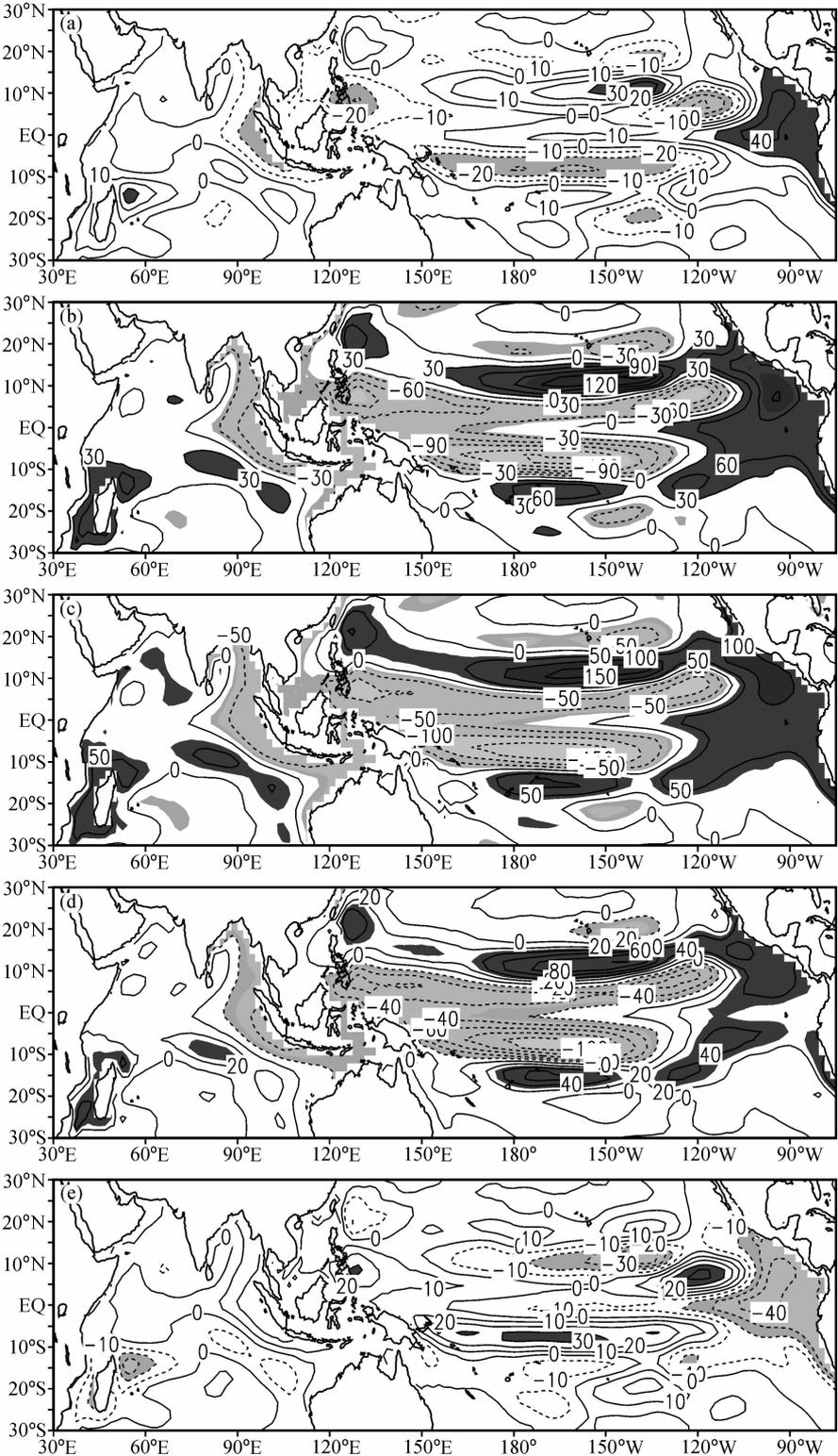


图6 低通滤波后的模拟的海面高度 ( $Z_0$ ) EOF 第一特征向量的空间分布  
(a) 0°位相; (b) 45°位相; (c) 90°位相; (d) 135°位相; (e) 180°位相

西,使得主要的年际变化异常中心位置也随之移到赤道中太平洋。其次,模式模拟的 ENSO 事件非常规则,基本上以准两年振荡为主,实际上 ENSO 应该表现为 2~7 年周期的不规则振荡。与观测结果相比,模拟的海面高度在赤道外 5~10°N 之间传播速度明显高于观测值,这就使得模拟的海面高度距平在赤道上和赤道外呈显著的负相关特征,观测的海面高度距平则无此现象。由于模式过高地估计了在赤道外 5~10°N 之间海面高度距平向西传播的速度,例如从图 6 中可以看出海面高度异常在赤道外只需要 1 年就可以从东太平洋传播到西太平洋暖池,因此,模拟的 ENSO 周期比观测结果大为缩短。此外,模拟的 ENSO 事件在热带印度洋上也有明显的反映,在 ENSO 的成熟位相,模拟的海面高度距平在赤道东西印度洋距平符号相反,表现为印度洋偶极子 (IDM) 的空间分布特征。

模拟的海平面高度 Z1 的第一主分量解释总方差的 50.5%,与模拟的海面高度 Z0 相比在以下几方面存在显著的差别(图 7)。首先,在印度尼西亚海道关闭以后,无论是在赤道上还是在赤道外,敏感性试验模拟的海面高度 Z1 基本上没有表现出向东传播的特征,在赤道太平洋和印度洋都主要表现为驻波形式的振动。其二,复 EOF 分析还指出,不同于控制试验模拟的非常规则的准两年 ENSO 循环,海面高度 Z1 的年际变化周期略有增加,并且变得不规则起来,周期大概为 2~3 年。最后,比较复 EOF 分析的特征特征向量以及由其重建的海面高度(图 8),可以发现在印度尼西亚海道关闭后的敏感性试验中,模式模拟的 ENSO 事件振幅明显减弱。这是因为当人为地将印度尼西亚海道关闭之后,从赤道太平洋向印度洋的热量输送被隔绝,因此赤道印度洋海温会降低,热带西太平洋海温会增加,特别是西太平洋温跃层会加深,最终导致赤道太平洋温跃层深度对比加大<sup>[10]</sup>,从而改变了模式中 ENSO 事件的特征。因此,印度尼西亚贯穿流对热带太平洋和印度洋年际变化特征的影响非常显著。

## 6 结论与讨论

本文利用 1993~2000 年的卫星海面高度计资料,分析了热带太平洋和印度洋海面高度的季节循环和年际变化特征,并与模式结果进行了对比分析,主要结论如下:

与观测的海面高度相比,耦合模式 FGCM0 可以大体上模拟出海面高度的半年循环和 1 年循环的特征,特别是模式对半年变化的模拟更为真实。同时,耦合模式 FGCM0 还可以在相当程度上模拟出 ENSO 事件的基本特征,特别是模式模拟的 ENSO 循环与“延迟振子”理论所描述的机制十分相像,即模式模拟的海面高度距平在赤道上是西太平洋向东太平洋传播,在赤道外则由东太平洋向西太平洋传播,从而构成了一个完整的 ENSO 循环。但是,模式也在许多方面存在显著的误差,如在赤道太平洋没有模拟出向西传播的年循环信号,模拟的 ENSO 事件主要局限于赤道附近并且模拟的周期以准两年振荡为主等等。需要指出的是,目前 FGCM0 存在的上述问题或者缺陷,是大多数直接耦合模式所共同存在的、具有普遍性的问题,也是下一步研究亟需解决的关键问题。

比较印度尼西亚海道被关闭前后的两个试验模拟的海平面高度 Z0 和 Z1,可以发现印度尼西亚海道的关闭却对热带太平洋和印度年际变化有显著影响,当模式允许印度

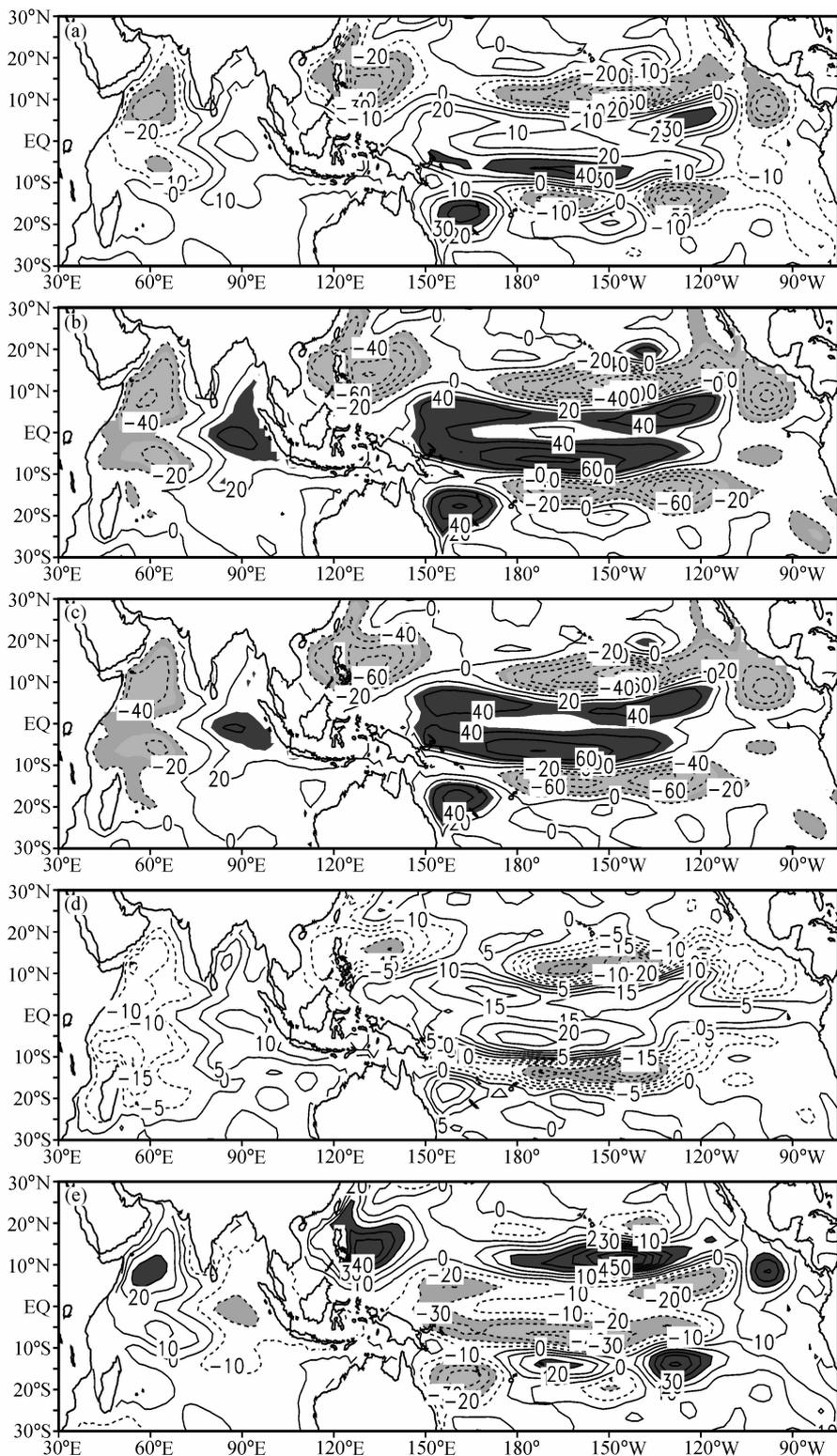


图7 低通滤波后的模拟的海面高度(Z1)CEOF第一特征向量的空间分布

(a) 0°位相; (b) 45°位相; (c) 90°位相; (d) 135°位相; (e) 180°位相

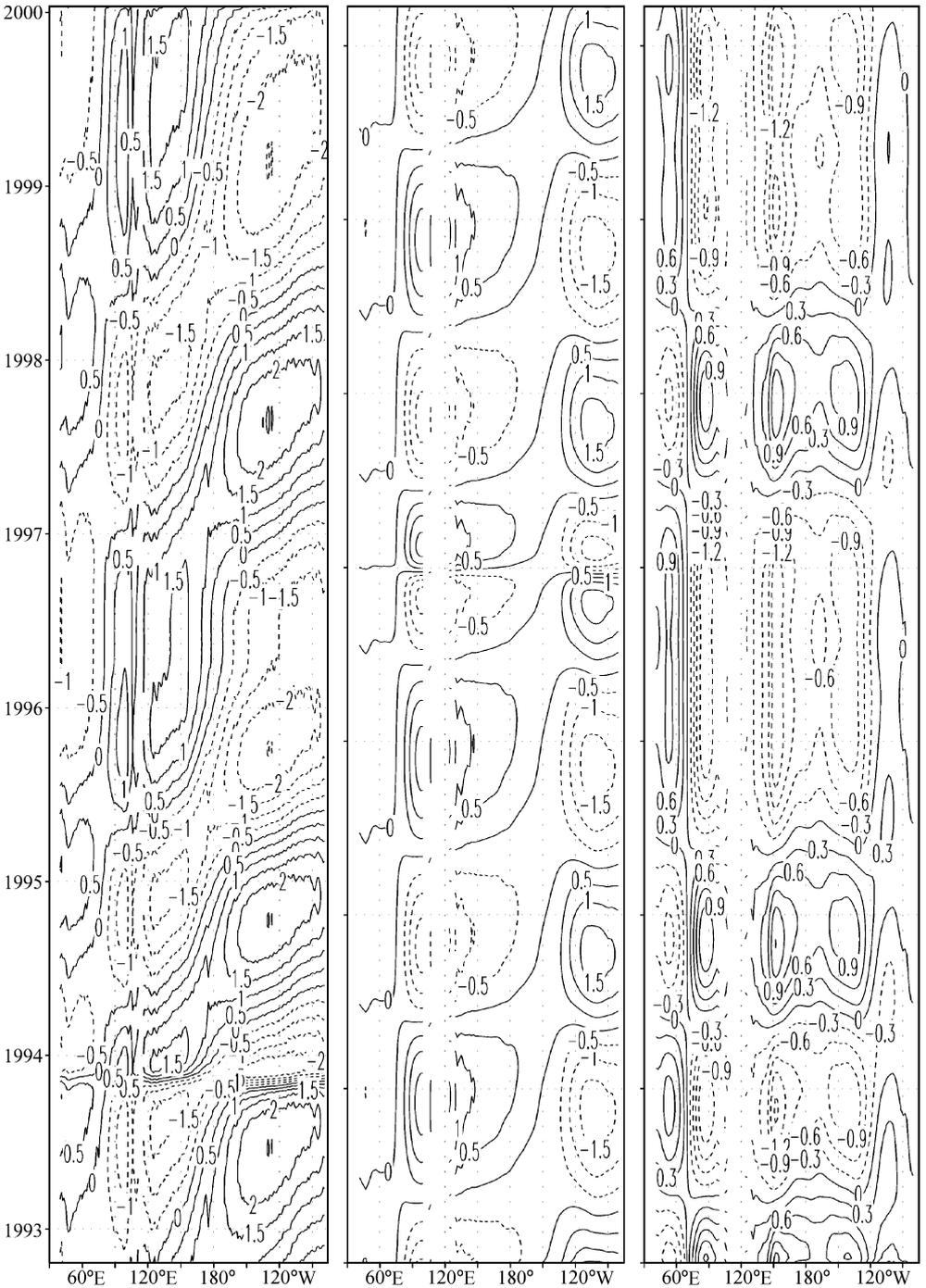


图 8 由 CEOF 分析重建的海面高度在  $2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$  平均的年际变化特征

左: 观测的海面高度; 中: 模拟的海面高度  $Z_0$ ; 右: 模拟的海面高度  $Z_1$

尼西亚贯穿流的存在时, 模拟的年际变化异常信号表现为从赤道印度洋向赤道太平洋传播的特征, 与观测结果比较类似, 但模拟的年际变化周期较短, 主要以准两年振荡为主; 当印度尼西亚海道关闭以后, 模式模拟的年际变化信号在赤道太平洋和印度洋

基本上驻波形式的振荡, 基本没有东传或者西传的特征, 同时模拟的年际变化周期变得较长和较为不规则。因此, 从本文的耦合模式数值模拟试验来看, 印度尼西亚贯穿流的存在对整个赤道太平洋和印度洋年际变化的特征有显著影响。

从模式结果来看, 印度尼西亚贯穿流对太平洋和印度洋的年际变化的作用十分显著。但是需要指出的是, 由于目前模拟的 ENSO 事件与观测还有许多不一致的地方; 此外, 限于模式的分辨率, 模式对印度尼西亚海道的描写还不够精确, 虽然模拟的印度尼西亚贯穿流强度与观测事实比较接近, 但还无法刻画贯穿流的细致的空间结构。由于上述限制, 本文的研究工作仅是初步的, 有待于使用更高分辨率、更完善的模式以及高质量的观测资料, 做更详细的研究。

**致谢:** 在本文的完成过程中, 作者曾与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刘海龙博士、周天军博士和李薇博士有多次讨论, 受益匪浅, 在此深表感谢。同时, 作者也非常感谢两名匿名审稿人对本文的中肯意见。

## 参 考 文 献

- 1 Gates, W. L., A. Henderson-Sellers, G. J. Boer et al., Climate Models—Evaluation, In: Climate change 1995, The Science of Climate Change, Contribution of Working Group 1 to Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edited by L. T. Houghton, L. G. Callander, N. Harris et al., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1996, 572pp.
- 2 Covey, C., S. Joussaume, V. Kattsov et al., Model Evaluation, In: Climate Change 2001, The Science of Climate Change, Contribution of Working Group 1 to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edited by L. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, et al., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001, 881pp.
- 3 Villwock, A., and M. Latif, Indian Ocean response to ENSO, International Conf. on Monsoon Variability and Prediction, Vol. II, WCRP-84, Geneva, Switzerland, 530~537.
- 4 Tourre, Y. M., and W. B. White, 1995, ENSO signals in global upper-ocean temperature, *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, **25**, 1317~1332.
- 5 Tourre, Y. M., and W. B. White, Evolution of the ENSO signal over the Indo-Pacific domain, *J. Phys. Oceanogr.*, 1997, **27**, 683~696.
- 6 Webster, P. J., A. Moore, J. Loschnigg et al., Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean, *Nature*, 1999, **401**, 356~360.
- 7 Saji, N. N., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran et al., A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, 1999, **401**, 360~363.
- 8 李崇银、穆明权, 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响, *大气科学*, 2001, **25** (4), 433~443.
- 9 吴国雄、孟文, 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I. 资料分析, *大气科学*, 1998, **22** (4), 470~480.
- 10 Schneider, N., and T. P. Barnett, Indonesian Throughflow in a CGCM, *J. Climate*, 1997, **11**, 676~689.
- 11 Wajswowicz, R. C., and E. K. Schneider, The Indonesian Throughflow's effect on global climate, *J. Climate*, 2001, **14**, 3029~3042.
- 12 Masumoto, Y., and T. Yamagata, Seasonal variations of the Indonesian throughflow in a general ocean circulation model, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**, 12287~12293.
- 13 Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehogn et al., A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (1), 169~190.

- 14 Boville, B. A. , and J. W. Hurrell, A Comparison of the atmospheric circulations simulated by the CCM3 and CSM1, *J. Climate*, 1998, **11**, 1327~1341.
- 15 Jin Xiangze, Zhang Xuehong, and Zhou Tianjun, Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.* , 1999, **16** (2), 197~215.
- 16 张学洪、俞永强、宇如聪等, 一个大洋环流模式和相应的海气耦合模式的评估 I. 热带太平洋年平均状态, *大气科学*, 2003, **27**, 949~970.
- 17 Gent, P. R. , and J. C. McWilliams, Isopycnal mixing in ocean circulation models, *J. Phys. Oceanogr.* , 1990, **20**, 150~155.
- 18 Philander, S. G. H. , D. Gu, D. Halpern et al. , Why the ITCZ is mostly north of the equator, *J. Climate*, 1996, **9**, 2958~2972.
- 19 张学洪、俞永强、刘海龙, 海洋环流模式的发展和应用 I. 全球海洋环流模式, *大气科学*, 2003, **27**, 607~617.
- 20 俞永强、A. Izard、张学洪等, IAP/LASG 海洋环流模式对风应力的响应, *大气科学*, 2001, **25** (6), 721~739.
- 21 Dai Fushan, Yu Rucong, Zhang Xuehong et al. , The impact of low-level cloud over the eastern subtropical Pacific on the "Double ITCZ" in LASG FGCM0, *Adv. Atmos. Sci.* , 2003, **20** (3), 461~474.
- 22 李江龙、张学洪、俞永强等, 耦合海-气环流模式中热带双辐合带现象及其热收支分析, *气象学报*, 2003, **61**, 39~51.
- 23 Chelton, D. B. , J. C. Ries, B. J. Haines et al. , Satellite altimetry. , *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A handbook of Techniques and Applications*, L. -L. Fu and A. Cazenave, Eds. , Academic Press, 2001, 463pp.
- 24 Silvia, A. V. , Statistical Methods for Signal Detection in Climate, Dcess Report No. 2, 2001, 77~82.
- 25 Trousenkov, S. T. , O. O. Trusenkova, P. I. Ponomarev et al. , Complex EOF Patterns of the Northwest Pacific SST Anomalies.
- 26 Davey, M. K. , M. Huddelston, K. R. Sperber et al. , STOIC: a study of coupled model climatology and variability in tropical ocean regions, *Climate Dyn.* , 2002, **18** (5), 403~420.
- 27 Schopf, P. S. , and M. J. Suarez, Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.* , 1988, **45**, 549~566.
- 28 Battisti, D. S. , and A. C. Hisrt, Interannual variability in a tropical atmosphere-ocean model: influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity, *J. Atmos. Sci.* , 1989, **46**, 1687~1712.
- 29 Latif, M. , K. Sperber, J. Arblaster et al. , ENSIP: the El Niño simulation intercomparison project, *Climate Dyn.* , 2001, **18** (3/4), 255~276.

# Numerical Simulation of Seasonal Cycle and Interannual Variation of Sea Surface Height in the Tropical Pacific and Indian Oceans

Li Yanling<sup>1)</sup>, Yu Yongqiang<sup>1)</sup>, Zhang Xuehong<sup>1)</sup>, and Xiao Wenan<sup>1)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

2) (*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

**Abstract** The seasonal cycle and interannual variation of sea surface height from TOPEX/Poseidon and ERS-1/2 are analyzed in the tropical Pacific and Indian Oceans, and they are compared with those from a coupled climate model FGCM0 in order to assess the ability of the model to simulate seasonal cycle and interannual variation in sea level height. The results show that although there are somewhat systematic errors in the coupled model, the model simulates the basic features of seasonal cycle and interannual variability of sea surface height to the considerable extent. In order to examine the impact of Indonesian Through Flow (ITF) on the seasonal cycle and interannual variation of sea surface height, a sensitivity experiment is accomplished, in which the Indonesian passage is closed fully in the coupled model. Comparison between control and sensitivity experiments suggests that ITF modifies significantly interannual variation of sea surface height in the tropical Pacific and Indian Oceans.

**Key words:** sea surface height; coupled model; Indonesian Through Flow (ITF)