

一个自由表面热带太平洋环流模式及其应用*

张荣华

(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 基于曾庆存海洋环流模式设计思想和大气物理研究所海洋环流模式(IAP OGCM), 设计并实现了高分辨率的自由表面热带太平洋环流模式(区域为南北纬 30° , 经纬圈方向的水平分辨率分别为 1° 和 2° , 垂直方向分为 14 层). 模式中考虑了盐度并引入与洋流切变和层结稳定度有关的垂直扩散参数化方案及对流调整方案. 用该模式已进行了大量的数值模拟和比较试验, 充分表明该模式的优良性能和广阔的应用前景. 文中给出了一些热带太平洋环流数值模拟及其应用实例.

关键词 高分辨率自由表面热带 OGCM 数值模拟和比较试验 性能和应用

热带太平洋环流在全球气候形成和变化中具有特别重要的作用. 数值模式的发展为认识其环流演变规律及研究与大气相互作用等提供了强有力的诊断分析和数值模拟工具, 并为探索月、季和年际气候预测的有效理论和方法开辟了前景. 国际上一直采用由 Bryan 设计并实现的三维非定常 OGCM^[1], 但如曾庆存^[2]所指出的, 该类模式所引入的“刚盖”近似不仅存在物理和数学方面的不合理性, 而且模式结果与最易观测的海面起伏资料间的比较分析和同化应用等方面带来困难. 为此, 中国科学院大气物理研究所已发展并实现了自由表面 OGCM, 并且在模式的计算设计、数值求解等方面都具有其特色. 由此所发展的各类模式已分别用于全球平均环流^[3]、太平洋平均环流及其季节变化^[4~8]、海洋与大气耦合模式设计及气候变化^[9~11]等的数值模拟研究之中. 本工作旨在建立一个高分辨率的自由表面热带太平洋环流模式系统, 为我国未来热带太平洋环流的业务预报和进一步发展、改善用海气耦合模式进行气候数值模拟和月、季及年际气候预测研究奠定基础.

1 自由表面热带太平洋环流模式简介^[12]

本工作的自由表面 OGCM 是在大气物理研究所海洋环流模式基础上发展起来的. 该模式与国际上常用的模式有很大差别(表 1). 例如, 考虑到“刚盖”近似本质上是整层无辐散近似, 它消除了“有效表面位能”, 歪曲了能量间的转换和循环. 因此有必要解除这一近似而把海表面作为自由面来处理, 引入海面起伏作为直接计算变量; 为便于处理自由表面上边界条

1993-10-08, 1994-02-04 收修改稿

* 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 LASG 资助项目

1) 张荣华. 大洋环流模式的设计及太平洋大尺度环流数值模拟研究. 中国科学院大气物理研究所, 博士论文, 1989

件,采用大气环流模式中常用的地形坐标系(σ -坐标系),引入热力学场的标准层结分布(图1),而时间积分时只计算其偏差,这样构造出保持总有效能量守恒的方程组,缩小了动能和位能间的量级差别,有利于计算稳定和减小计算误差.所设计的空间差分格式,既能完全保证微分方程的整体性质,以能保证总有效能量各分量之间有正确的相互转换,避免计算模.为提高包含重力外波的自由表面 OGCM 的计算效率,时间积分采用正、斜压模分解算法^[13].数值试验表明,采用这一算法的自由表面 OGCM 反而比采用“刚盖”近似的 OGCM 更省时、方便.

表1 大气物理研究所海洋环流模式(IAP OGCM)

和国际上广泛使用的美国地球流体动力学实验室

海洋环流模式(GFDL OGCM)主要差别

	IAP OGCM	GFDL OGCM
自由面处理	自由表面	“刚盖”近似
垂直坐标	地形坐标(σ -系)	高度坐标(z -系)
热力学变量的预报	相对于标准层结的偏差	变量本身
模式整体性质	总有效能量守恒性	总能量守恒性
空间差分格式	总有效能量守恒格式	总能量守恒格式
时间积分方法	不同过程分解,正压模显式求解	正压模超松弛迭代求解

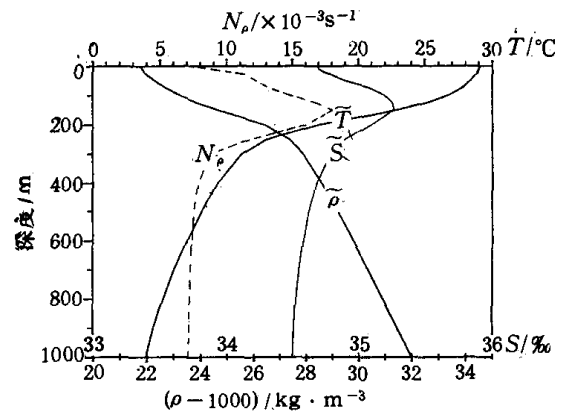


图1 模式所采用的海洋标准层结分布

其中 $\tilde{T}$, $\tilde{S}$, $\tilde{\rho}$ 分别为海水温度、盐度和密度, N_p 为海洋 Brünt-Väisälä 频率

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 4000m 深), 但考虑热带太平洋真实海陆边界(见图 2). 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(其中表层 60m 分辨率为 20m, 60m 至 240m 之间分辨率为 30m). 时间积分时正压模时间步长为 5 min(显式求解), 斜压模及平流过程和耗散过程取为 2h. 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致到 30°N(S) 值为 $3 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$; 垂直扩散和摩擦系数则与表征洋流切变和层结稳定度的 Richardson 数有关. 模式中包盐度及发生静力不稳定时所采用的对流调整方案. 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°N(S))处温盐方程中包含松弛项 $\gamma(T^* - T)$ 和 $\gamma(S^* - S)$, 其中 T 和 S 分别为温度和盐度, γ 为 Newton 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). 模式的初条件取洋流和海面起伏为零, 温盐用 Levitus 观测资料. 模式的强迫场为大气海表风应力、海表热通量和海表淡水通量(蒸发与降水之差).

2 平均环流及其季节变化

用国际上常用的 Hellerman 和 Rosenstein 风应力资料驱动 OGCM 进行热带太平洋平均环流及其季节变化的数值模拟, 先用年平均风应力、热量和淡水通量积分一年, 后用其季节变化场(由逐月资料线性插到每天)再积分 3 年, 得到一个准季节循环的平衡态, 对其最后一年结果进行分析.

2.1 海面起伏

图 2 给出模拟得到的热带太平洋年平均海面起伏(单位: cm). 可见, 模式非常成功地再现了已有的一些观测特征^[8], 特别是热带太平洋地区经圈方向的赤道槽、赤道脊、北赤道逆流槽及北赤道脊结构和赤道上东西向的西高东低等分布. 模式海面起伏季节变化表明(图略), 赤道槽在冬季和早春强, 而赤道脊和北赤道逆流槽则在秋季强. 它们与热带太平洋海表洋流季节变化有很好的对应关系, 并已为观测分析所证实.

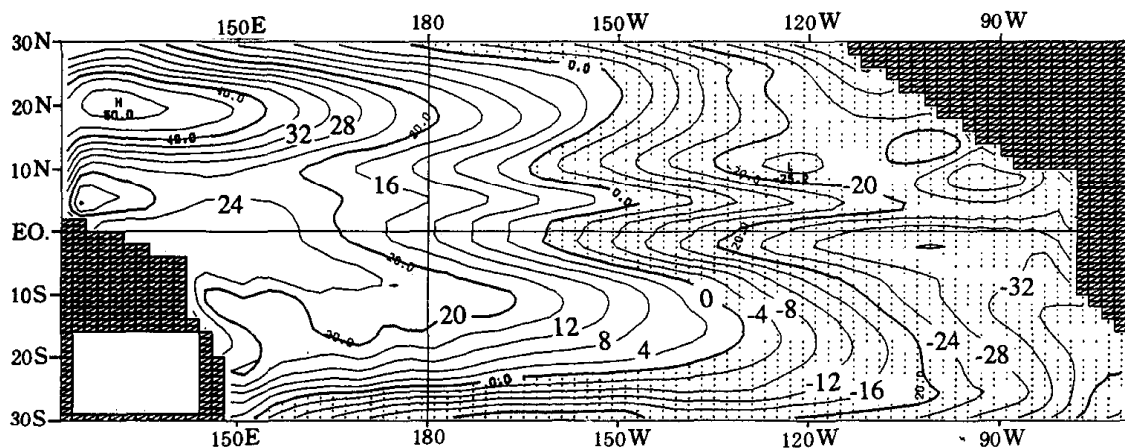


图 2 模拟得到的热带太平洋平均海面起伏
单位为 cm, 等值线间隔为 4 cm, 点区为负海面起伏

2.2 海流

太平洋平均洋流及其季节变化数值模拟已在文献[6~8]中有详细描述, 在高分辨率的自由表面热带太平洋 OGCM 中, 模拟结果与一些实际观测更为接近. 图 3(a) 给出了模拟得到的赤道上表层纬圈洋流随季节变化. 可见模式较为成功地再现了 4 月至 7 月间赤道中、东太

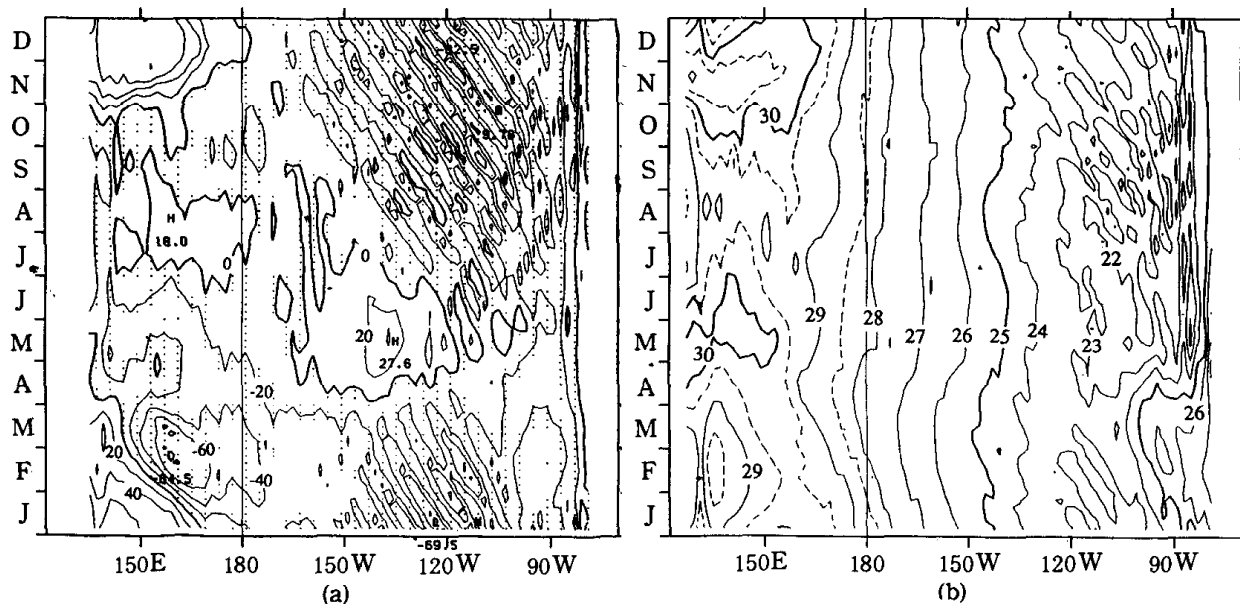


图 3 赤道上海表纬圈洋流(a)和海表温度(b)随季节变化

海流等值线间隔为 20 cm/s, 点区表示向西流, 温度线间隔为 1°C, 一些 0.5°C 间隔线用虚线表示

平洋地区表层流反向(自西向东)现象;同时模拟的赤道潜流(EUC)也有明显的季节变化(图略).

2.3 海温

因采用 Haney 型海表热通量参数化方法^[9], 我们所发展的各类 IAP 型 OGCM 对海温场模拟都较为逼真^[6~8]. 模式分辨率的提高进一步改进了结果, 如经圈方向温度场槽脊分布和赤道斜温层结构等. 赤道上海表温度(SST)随季节变化如图 3(b) 所示, 其最显著特征是赤道中、东太平洋地区海表春季增暖和秋季冷却现象, 这些与观测相一致.

3 1986 ~ 1987 年 (El Niño) 和 1988 年 La Niña 事件

在观测到的美国 Florida State University 所整编的风应力和热量及淡水通量驱动下, 所发展的模式从 1984 年积分至 1989 年. 在此时段内, 热带太平洋经历了一次中等强度的 1986 ~ 1987 年 El Niño 和近十几年来最强的 1988 年 La Niña 事件. 各种变量场的时空结构及其演变表明, 模式成功地模拟出 1986 ~ 1987 年 El Niño 和 1988 年 La Niña 现象.

始于 1986 年中, 赤道西太平洋的西风异常, 所推动的向东表层洋流不断向中东太平洋输送暖水, 到 11 月份, 大量暖水在日界线附近堆积, 使其海面上升(达 32cm)和斜温层(用 20℃ 等温线深度表示)加深. 1986 年底的强西风异常激发出赤道 Kelvin 波, 并向赤道东太平洋和南美沿岸传播, 使其那里的斜温层加深和海面上升, 且具有双峰结构; Kelvin 波所伴随的垂直冷平流的减弱造成中东太平洋 SST 上升, 1987 年春季在中东太平洋和南美沿岸地区存在强的正 SST 异常, 并伴随着整个赤道太平洋斜温层东西方向变平、赤道潜流弱而浅. El Niño 相伴随的热带太平洋环流异常首先于 1987 年中从东太平洋开始消失, 而中西太平洋则一直维持到 1988 年初. 其后, 热带太平洋进入冷期, 其时空结构与 1986 ~ 1987 年的暖期反向. 图 4 分别表示 1988 年底赤道上西经 140° 处温度和纬圈洋流垂直廓线. 表明在 El Niño 年, 赤道中太平洋增暖、斜温层变深、赤道潜流中心深度变浅而强度减弱(图 4(a)), 而在 La Niña 年则该地区变冷、斜温层变浅、赤道潜流中心强而深(图 4(b)).

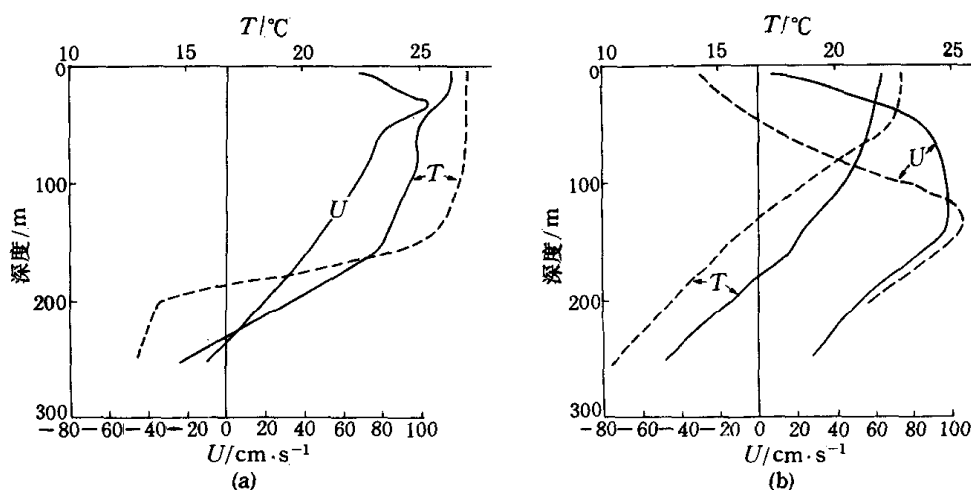


图4 赤道上西经 140° 处模式(实线)和 Mooring 观测(虚线)得到的纬圈洋流(U)和温度(T)的垂直分布

(a) 1986 年底(其中缺 U 观测值), (b) 1988 年底

4 模式性能的其它检验

4.1 1984 至 1989 年间模式和观测结果间的比较

近年来,随着海洋观测技术的发展,对海洋表层和深层洋流及热力结构的描述、动力过程的诊断分析和与数值模式间比较成为可能.特别由于针对热带太平洋开展的广泛国际合作所实施的强化观测试验,积累了热带太平洋环流时空演变的宝贵资料.其中有海岛站水位计和地球卫星海面起伏观测资料及 Mooring 洋流和温度场观测资料等.我们详细比较了模式结果与热带太平洋海岛站和美国地球卫星海面起伏观测资料,也与赤道西太平洋 (165°E)、中太平洋 (140°W) 和东太平洋 (110°W) 由 Mooring 观测到的表层和次表层洋流及温度场进行了比较.图 4 中分别给出了由 Mooring 观测到的 1986 年底和 1988 年底赤道上西经 140° 处温度和纬圈洋流垂直廓线.表明模式成功地模拟出与 1986~1987 年 El Niño 和 1988 年 La Niña 事件相联系的热带太平洋水位距平及温流场时空变化.特别与 18 个海岛站平均相关系数高达 0.79,而与其平均误差只有 4.5 cm(表略).

4.2 两类不同 OGCM 间的比较研究

近年来,OGCM 在观测到的大气强迫场驱动下进行平均环流及其季节和年际变化数值模拟已取得重大进展,特别是数值天气预报的成功有力地推动和鼓舞了海洋环流数值预报工作的开展,国际上已在进行热带太平洋环流即时(real time)海况预报(如美国的国家气象中心).尽管如此,相对观测而言,数值模式仍有很大误差;同时不同研究机构发展的模式间差别也很大.因此,基于模式研究工作的任务之一是考察这些误差和差别的性质和原因,以便改进现有模式.实现这一目标的有效途径之一是进行不同模式间的比较研究和敏感性试验.

OGCM 对大气强迫场和垂直扩散参数化方案及模式参数的比较试验表明,模式对它们有较大的敏感性,说明在海洋环流数值模拟时准确描述和合理选取它们的重要性.另一方面,正如大气模式已证实的那样,OGCM 结果可能对其动力框架构成有敏感性.特别,如表 1 所示,中国科学院大气物理研究所 OGCM 和国际上常用的 GFDL OGCM 从模式动力框架设计到计算方法有很大差别,那么由此所造成的模式结果是否有差别呢?

在完全相同的模式分辨率、相同的模式参数和物理过程参数化方案、相同的大气强迫场和相同的时间积分过程,这两类模式分别从 1984 年积分到 1989 年.两模式结果分别与对应的海面起伏观测资料(海岛站水位计和地球卫星),以及赤道上 3 个点 (165°E , 140°W , 110°W) 由 Mooring 观测到的洋流和温度垂直分布进行了详细比较.

因为 GFDL 为“刚盖”近似模式,没有海面起伏预报场,但可计算相对于某一深度(取为 $48 \times 10^7 \text{Pa}$) 的动力高度以代表海面的时空变率;而海面起伏是 IAP OGCM 的直接预报变量,同时也可同样计算出动力高度.与热带太平洋 18 个海岛站海面起伏观测比较表明,IAP OGCM 动力高度的平均相关系数和误差分别为 0.79 和 4.5cm,而 GFDL OGCM 则为 0.72 和 5.1cm.同洋流和温度场 Mooring 测量比较表明,两模式有一些共同的误差,但 IAP OGCM 比 GFDL OGCM 有一些明显的改进.主要表现在垂直温度梯度(IAP OGCM 更强),SST(IAP OGCM 中东太平洋偏冷现象有所减弱)、向西流动的南赤道洋流强度和厚度以及斜温层和 EUC 中心深度等.特别,在时间积分 8 年(先用 1984 年强迫场驱动模式,3 年得到一个季节变化的准平衡态,然后用逐月变化的强迫场从 1984 年积到 1988 年)以后,两模式赤道东太

平洋 SST 差可达 2°C , 次表层 (200 ~ 300m) 温度差可达 4°C , 赤道中东太平洋 EUC 中心深度差可达 50m 以上. 这一比较研究表明, 即使用相同的模式分辨率和模式参数, 相同的大气强迫场, 但是不同的动力构成 (表 1), 模式结果间的差别可与观测到的季节和年际变率相当, 说明模式结果对动力构成的敏感性. 因此, 为更好地模拟海洋环流及其季节变化, 应重视海洋模式的动力框架设计; 同时也有力地说明, IAP OGCM 动力框架设计的合理性和优越性.

4.3 由海面起伏资料构造海洋热力场的试验

利用 1984 年至 1989 年模式模拟结果所提供的模式海候场、海面起伏与次表层温度场之间的统计关系, 以及观测和模拟得到的海面起伏时空变率统计特征, 进行了由海面起伏资料构造海洋温度场的试验, 得到一些令人鼓舞的结果. 图 5(a) 给出了 1986 年至 1989 年间模式时间积分模拟得到的赤道海表温度异常 (SSTA) 随时间的演变, 而图 5(b) 则是根据海面起伏异常及一些统计关系构造出来的相应 SSTA. 可见后者比较成功地再现了 SSTA 基本特征, 如 1986 年底中、东太平洋增暖及其东传, 而 1988 年中、东太平洋变冷等. 因此, 仅给定海面起伏资料, 有可能再现出热带海洋的流场和热力场的三维结构. 但是如何从海面起伏定量地推算次表层动力和热力结构及其变化, 更有效地构造同化方法等问题有待于进一步探讨.

5 结语

本工作所发展的自由表面热带太平洋环流模式仅仅是中国科学院大气物理研究所自行发展起来的各类 OGCM 中的一个, 理论和数值模拟结果都证实该模式从理论设计、数值求解到结果分析及应用都较国际上使用的 OGCM 有优越之处. 正如本文所简要给出的那样, 该模式在热带海洋环流动力学、气候动力学方面研究有广阔的应用前景. 特别是进行海面起伏资料同化, 设计与大气耦合模式以进行海气相互作用研究等. 对模式的进一步改进和应用必将为发展我国热带太平洋环流预报系统和进行月、季和年际尺度气候变化和异常预测研究起积极作用.

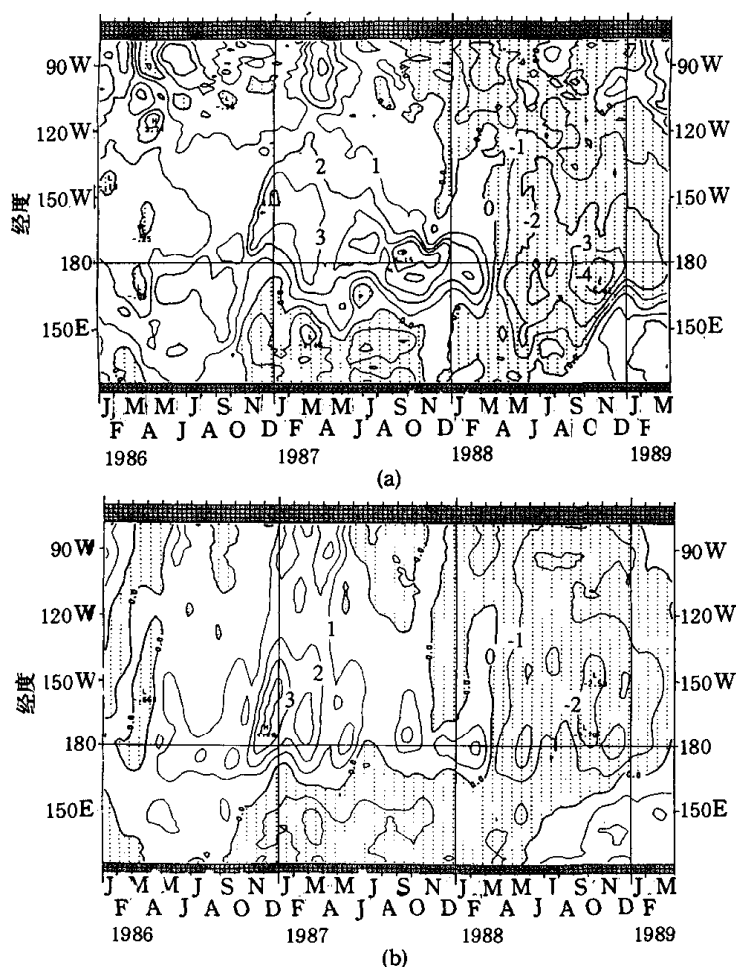


图 5 1986 至 1989 年间赤道太平洋 SSTA 随时间演变
等值线间隔为 1°C , 实线区为正, 点线区为负. (a) 模式时间积分结果,
(b) 仅由模式海面起伏异常和统计关系构造出来的 SSTA

致谢 作者非常感谢导师曾庆存教授对本工作的长期指导和支持。本研究部分工作是作者获日本国科学技术厅(STA)Fellowship 资助在日本气象厅气象研究所(MRI/JMA)海洋研究部工作期间完成的,特别得到 Host Scientist Dr. M. Endoh 各方面的帮助和指导;同时得到该部 Dr. Y. Kitamura 等的帮助,作者在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- 1 Bryan K. A numerical methods for the study of the circulation of the world ocean. *J Comput Phys*, 1969, 4:347~376
- 2 Zeng Q C. Some numerical ocean-atmospheric coupling models. Paper presented at the First Interna Symp Integrated Global Ocean Monitoring Tallinn USSR (Oct. 2~10), 1983
- 3 Zhang X H, Liang X Z. A numerical world ocean general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6:44~61
- 4 Zeng Q C, Zhang X H, Zhang R H. A design of an oceanic GCM without the rigid-lid approximation and its application to the numerical simulation of the circulation of the Pacific ocean. *J Mar Syst*, 1991, 1:271~292
- 5 张荣华,曾庆存,张学洪. 太平洋大尺度环流数值模拟——I. 数学模式及其性能. *大气科学*, 1991, 15(4):1~16
- 6 张荣华,曾庆存,张学洪. 太平洋大尺度环流数值模拟——II. 长期平均环流. *大气科学*, 1991, 15(5):51~64
- 7 张荣华,曾庆存,张学洪. 太平洋大尺度环流数值模拟——III. 季节变化. *大气科学*, 1991, 15(6):1~16
- 8 张荣华,曾庆存,张学洪. 一个改进的太平洋环流数值模式及其模拟结果. *中国科学, B 辑*, 1991, (5):541~549
- 9 曾庆存,袁重光,王万秋等. 跨季度气候距平数值预测试验. *大气科学*, 1990, 14(1):10~25
- 10 张荣华,王万秋. 太平洋海表温度异常数值模拟试验. *海洋学报*, 1991, 13(2):179~191
- 11 Zhang X H, Bao N, Yu R C *et al.* Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM. *Chinese J Atmos Sci*, 1992, 16:129~144
- 12 Zhang R H, Endoh M. A free surface general circulation model for the tropical Pacific. *J Geophys Res*, 1992, 97: 11237~11255
- 13 张荣华. 自由表面海洋环流模式的正、斜模分解算法. *大气科学*, 1994, 18(2):1~10
- 14 Zhang R H, Endoh M. Simulation of the 1986—1987 El Nino and 1988 La Nina events with a free surface tropical pacific ocean GCM. *J Geophys Res*, 1994, 99:7743~7759