

1986—1987 厄尔尼诺事件的数值模拟^{*}

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)

提 要

用高分辨率自由表面热带太平洋环流模式, 在观测到的风应力和热量、水汽通量驱动下, 对 1986—1987 厄尔尼诺 (El Niño) 事件进行了数值模拟。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 厄尔尼诺现象。始于 1986 年年中, 赤道西太平洋的西风异常所推动的向东表层洋流不断向东, 东太平洋输送暖水, 至 11 月份, 大量暖水在日界线附近堆积, 造成海面上升 (达 32cm) 和斜温层 (用 20°C 等温线深度表示) 加深。1986 年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赤道中、东太平洋海表温度上升; 1987 年春季在中、东太平洋和南美沿岸地区存在强的正海表温度异常, 并伴随着整个赤道太平洋斜温层东西方向变平、赤道潜流弱而中心位置变浅。厄尔尼诺相伴随的热带太平洋环流异常首先于 1987 年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。

关键词: IAP 自由表面热带太平洋 OGCM; El Niño 事件; 数值模拟。

一、引 言

影响全球气候异常并带来巨大经济损失的厄尔尼诺 (El Niño) 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严重关注。广泛而深入的观测诊断^[1]、理论分析和数值模拟等研究, 已揭示了 El Niño 事件孕育、发生、发展和消亡等全过程的动力机制及与大气环流间相互作用和它所造成的全球气候异常特征分布等一些共性, 但同时表明各类 El Niño 现象本身的多样性和复杂性以及各类模式模拟的敏感性和差异性。

为了准确、及时、有效地预测 El Niño 事件的发生和发展, 学术界正在研制各种复杂程度不同的数学模型进行数值模拟, 如简单的统计模型^[2]、约化重力海洋模式^[3,4]、简单海气耦合模式^[5]以及基于 Bryan 海洋环流模式^[6]发展起来的原始方程模型^[7-10]等。本文报道基于大气物理研究所海洋环流模式^[11-20]发展的高分辨、自由表面热带太平洋环

1993年11月3日收到, 1994年1月10日收到修改稿。

^{*} 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 LASG 资助项目。

- 1) 张荣华, 1989, 大洋环流模式的设计及太平洋大尺度环流数值模拟研究, 博士论文, 中国科学院大气物理研究所。
- 2) 张荣华等, 1990, A blocking technique for the representation of the bottom topography in an ocean general circulation model, 尚未发表。

流模式对 1986—1987 El Niño 事件进行的数值模拟。观测指出,这次事件属中等强度,它既不同于经典的 El Niño 事件^[1](如发生的季节、海表温度异常(SSTA)首先发生区域及随后的传播方向等),也不同于著名的 1982—1983 El Niño 事件(如强度和持续时间、事件后海洋状况等)。因此对这次比较特殊的 1986—1987 El Niño 事件进行数值模拟,一方面以加深对 El Niño 这类年际异常现象发生、发展等时空演变特征和动力机制的认识;另一方面以评估模式在观测到的大气强迫场作用下模拟年际变化的能力,为未来用该模式作实际预报及设计海洋、大气耦合模式进行气候预测提供依据。

二、自由表面热带太平洋环流模式简介^[17,18]

本文的自由表面海洋环流模式(OGCM)是由曾庆存设计的^[11]。该模式与国际上常用的模式^[6]有很大差别。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,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,有利于减小计算误差和计算稳定;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,又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^[16]。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。

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。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,60 至 240m 之间分辨率为 30m)。时间积分时正压模时间步长取为 5min(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。模式中包含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))区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)。模式的初条件取洋流和海面起伏为零,温度和盐度取为标准层结分布^[10];模式强迫场为大气海表风应力、海表热通量和淡水通量(蒸发与降水之差)。本文中风应力取自美国 Florida State University 所整编的逐月海表风应力资料^[12],热通量和淡水通量计算及资料来源说明详见文献[17]。因资料所限,一些计算热通量的大气参数及淡水通量未考虑其年际变化(即仅考虑随季节变化)。先用观测到的 1984 年大气风应力和气候热通量及淡水通量驱动模式三年,得到一个季节变化的准平衡态,后用逐日变化(由逐月观测资料线性插值到

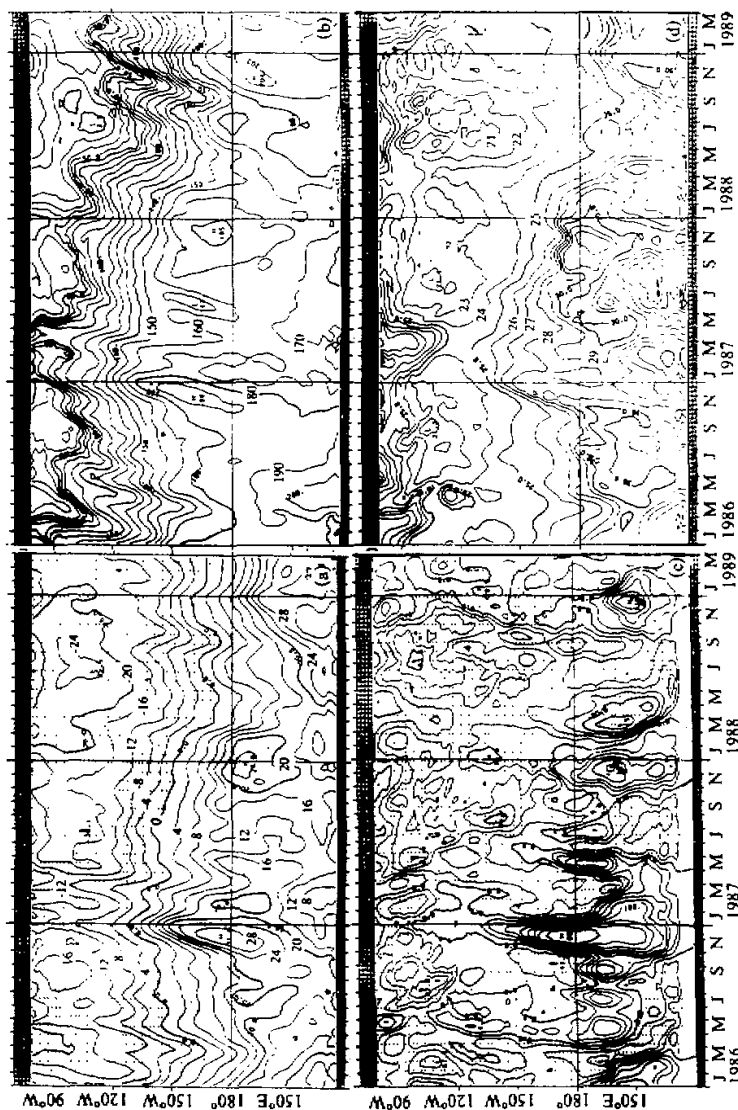


图 1 (a)赤道上海面起伏(等值线间隔为 4cm,点区为负海面起伏)、(b)20℃等温线深度(等值线间隔为 10m)、(c)表层洋流纬向分量(等值线间隔为 10cm/s,点区为向西流)、(d)海表温度(等值线间隔为 1℃)随时间演变

每天上)的强迫场从 1984 年 1 月积分到 1989 年 3 月。在这期间,热带太平洋经历了一次中等强度的 1986—1987 El Niño 和几十年来最强的 1988 反厄尔尼诺 (La Niña) 事件。下面将给出模式对 1986—1987 El Niño 事件的数值模拟结果。

三、海面起伏和 20℃ 等温线深度

图 1a 给出了模拟得到的赤道上海面起伏随时间的变化,图 2 为 1986 年 12 月和 1987 年 3 月热带太平洋海面起伏水平分布。海面起伏平均分布及其季节变化特征在这些图中得到清楚的反映^[20,21],如赤道上海面起伏西高东低,沿经圈方向的赤道槽、赤道脊、北赤道逆流槽和北赤道脊等;赤道槽在春季较强而在秋季弱。同时,也表示海面起伏有非常大的年际变化。

在 1986 年初,赤道上存在强的东西向水位差,其中西边高出海平面 36cm,东边低于海平面 20cm。始于 1986 年年中,赤道西太平洋的暖水逐渐开始向中、东太平洋运移,海面起伏零线从中太平洋向东太平洋移动;至 1986 年 11 月,大量的暖水在日界线附近堆积,致使那里的水位升至最高(达 32cm);随后,高水位区急速向东传送,海面起伏零线已抵达 130°W 的最东端。由于西太平洋的暖水被运往东边而亏损,赤道太平洋西边界地区水位仅高出海平面 8cm,以致西太平洋地区正常的东西向水位差完全反向(图 2),并且一直维持到 1988 年年初。在东太平洋和南美沿岸地区,海面起伏演变出现双峰结构,一个高水位出现在 1986 年年底,另一个次高水位出现在 1987 年 3—4 月,导致 1987 年春季整个赤道太平洋东西水位差很小(图 2b)。从 1987 年 4 月开始,东太平洋水位开始下降而西太平洋则回升,海面起伏零线开始西进,东西水位差逐渐增大;直至 1988 年初,热带太平洋进入反厄尔尼诺位相阶段。海面起伏中经圈方向槽脊演变如图 2 所示,在 1986

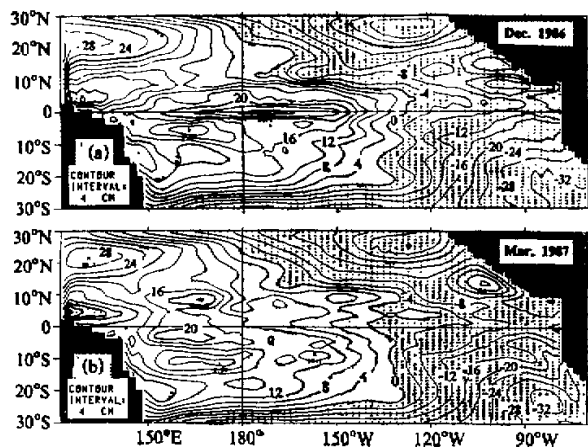


图 2 模拟得到的 1986 年 12 月(a)和 1987 年 3 月(b)热带太平洋海面起伏分布
等值线间隔为 4cm,点区为负海面起伏。

—1987 El Niño, 槽脊结构变得很不明显, 赤道槽很弱甚至不存在; 北赤道逆流槽也变得很弱; 同时, 北太平洋副热带高水位下降, 反气旋环流减弱。这说明, 与 El Niño 事件相联系的变化不仅发生在赤道区域, 也发生在副热带地区。这些海面起伏时空演变特征在相对于多年平均的异常图上更清楚可见(图略), 特别是在 1986 年末至 1987 年初, 正水位距平向东太平洋和南美沿岸传播特征非常明显, 净的暖水向东输送造成中、东太平洋为正水位距平, 而在西太平洋则为负水位距平。

模拟得到的赤道上 20°C 等温线深度(表示斜温层)随时间演变如图 1b 所示, 其中等温线深度变动范围可从西太平洋的 200m 到东太平洋的 30m。1986—1987 El Niño 特征在图中得到很好的反映。1986 年后期西太平洋斜温层逐渐变浅并一直维持到 1988 年初; 而中、东太平洋斜温层持续性加深始于 1986 年年中; 至 11—12 月间, 日界线以东出现 20°C 等温线深度的急剧加深(大于 190m), 并且这种加深现象向东传播; 在南美沿岸, 发生两次斜温层加深, 第一次在 1986 年底, 第二次在 1987 年 4 月。如在热带太平洋平均环流数值模拟中所指出的那样^[20], 20°C 等温线年际变化与海面起伏变化密切相关, 对这, 比较图 1a 和图 1b 清楚可见, 特别是 1986 至 1989 年 3 月间赤道上 140°W 、 110°W 处 20°C 等温线和海面起伏相关系数分别为 0.93 和 0.84, 但在 160°E 为 0.37。

四、流 场

赤道上纬圈洋流随时间演变如图 1c 所示。在赤道西太平洋, 对赤道西风局地响应的洋流变化发生于 1986 年 5 月和 1986 年后期。特别在 1986 年 10 月至 1987 年 1 月间, 日界线以西的强赤道西风异常激发出引人注目的表层和次表层强向东急流(同时可见图 3a), 其流速可达 186cm/s 。在中、东太平洋, 表层洋流有一个比较明显的季节变化(如南赤道洋流(SEC)从 3—7 月间的春季逆转现象和在 9—11 月间 SEC 加强), 与西太平洋西风异常相联系的显著变化包括 1986 年 3—6 月间表层洋流春季逆转的加强; 随着 1986—1987 El Niño 事件的发展, 向西的 SEC 在 1986 年 9—11 月间减速; 在 11—12 月间, 赤道上强向东表层洋流跨越几乎整个赤道太平洋; 1987 年上半年, SEC 仍比较弱, 随后

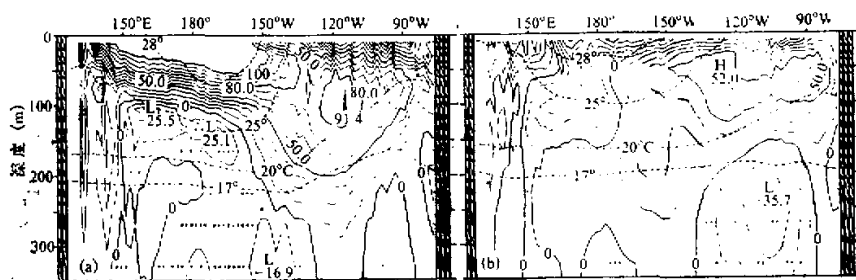


图 3 模拟得到的 1986 年 12 月(a)和 1987 年 3 月(b)赤道上纬圈洋流和

一些等温线的深度-经度剖面图

洋流等值线间隔为 10cm/s , 点区表示向西流。

SEC 开始向西加速。赤道上表层和次表层纬圈洋流时空演变在图 3 所示的深度-经度 剖面图上清楚可见。赤道潜流 (EUC) 一般位于 100—200m 深的斜温层中, 在西太平洋地区其中心流速在年末和年初减速并变成自东向西流。同 El Niño 事件相联系, 不仅表层 SEC 而且次表层的 EUC 也有明显的年际变化。特别, 随着越来越多的暖水向东移送并在中太平洋堆积, 日界线以西地区的斜温层梯度方向反向, 所对应的纬圈压力梯度推动西太平洋次表层洋流向西流动; 从 1986 年 12 月至 1987 年 3 月, 向东的赤道表层急流和 EUC 都开始减弱, EUC 流速中心深度抬升; 至 1987 年 3 月, 中、东太平洋的 EUC 变得很弱, 其流速中心深度也很浅; 而在西太平洋次表层则变为很强的自东向西流(与 EUC 方向反向)。

五、温 度 场

赤道上海表温度 (SST) 随时间演变如图 1d 所示。赤道东太平洋为从秘鲁海岸沿赤道向西延伸的冷水舌, 而赤道西太平洋为暖池^[20]; 赤道冷水舌在 9—11 月发展强盛(秋季冷却), 而在 3—5 月期间则变弱(即所谓的春季增温)^[21]。与 El Niño 事件相联系的 SST 变化始于 1986 年年中, 这时西太平洋逐渐增温, 最暖区(温度高于 30℃)东移至日界线附近; 至 1986 年末, 温度高于 28℃ 的暖水已东移至 150°W (图 4a); 1987 年春季赤道东太平洋和南美沿岸的 SST 增温加强、西伸加剧, 特别是在 1987 年 3—4 月, 从西太平洋东移和从南美沿岸西伸的暖区在东太平洋连通(图 4b)。从 1987 年 5 月开始, 随着中、东太平洋信风加强, 暖水逐渐西撤至日界线附近; 1987 年 7 月之后, SEC 的加强(图 1c)使赤道东太平洋 SST 冷舌迅速回复, 与 El Niño 相伴随的环流异常开始消失, 但中、西太平洋则一直维持到 1988 年初。

1986 至 1988 年间赤道太平洋 SST 演变在其异常图 (SSTA) 更清楚可见(图略), 特别 SST 正距平于 1986 年年中始于西太平洋, 随后逐渐东移越过日界线, 并于 1986 年 11—12 月迅速东传, 于 1987 年 3—4 月抵达南美沿岸, 此时整个赤道中、东太平洋和沿岸地区都为正距平所覆盖。赤道 SST 热量收支分析表明(图略), 赤道中太平洋 SST 升高主要归因于纬圈平流所致, 而东太平洋 SST 上升则主要由于与 Kelvin 波相伴随的垂直冷平流的减弱。

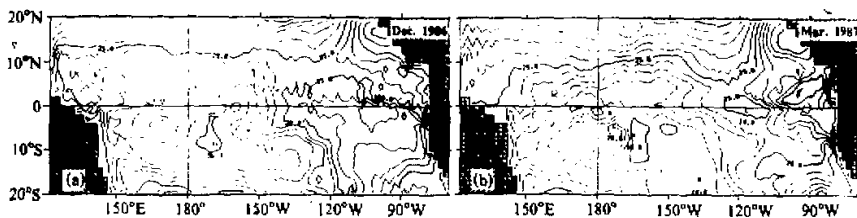


图 4 模拟得到的 1986 年 12 月(a)和 1987 年 3 月(b)热带太平洋 SST 分布
等值线间隔为 1℃。

图 3 给出了 El Niño 两个不同阶段赤道上一些等温线的经度-深度剖面图。如前所述, 1986 年年中开始暖水逐渐从西太平洋东运至日界线, 至 1986 年底, 大量暖水在日界线堆积, 造成斜温层加深, 西太平洋地区斜温层东西向梯度反向(图 3a); 随后, 日界线附近斜温层加深信号随 Kelvin 波迅速东传, 并于 1987 年 3 月抵达南美沿岸, 致使那里的 20℃ 等温线加深(大于 90m), 赤道斜温层自西向东向上倾斜正常特征几乎消失, 整个赤道上斜温层东西向几乎变为水平(图 3b), 这与 EUC 对应关系由图清楚可见。

六、结 语

用所发展的高分辨率、自由表面热带海洋环流模式, 在成功地模拟了观测到的热带太平洋平均环流及其季节变化^[20-22]之后, 本文又进行了对著名的 El Niño 事件这一年际气候异常的数值模拟。结果表明, 模拟成功地再现了 1986—1987 El Niño 现象, 特别是海面起伏、表层洋流和温度场以及次表层斜温层动力和热力结构时空演变特征, 令人鼓舞。尽管国内外对 El Niño 事件相联系的各种统计分析和动力研究非常之多, 但对 El Niño 现象本身的分析、研究因海洋观测资料而受到限制, 仅对海表观测场(如海表风应力和 SST 等)的统计分析难以弄清 El Niño 事件的全过程, 正如本文所给出的那样, El Niño 事件不但关联到表层环流之变动, 更牵涉到次表层和斜温层极其复杂的动力和热力结构调整。基于完整流体动力学方程组和综合考虑各种物理过程于一体的环流模式所进行的数值模拟为系统研究这一现象提供了强有力的工具。国际上用 Bryan “刚盖” 近似 OGCM^[6] 已进行了几次 El Niño 现象的数值模拟^[9-10], 但用自由表面 OGCM 对这类年际气候异常的数值模拟尚属首次, 特别是本模式能直接模拟出海面起伏分布(图 1a 和图 2), 这为进行模拟结果与海洋物理学中最易观测的海面起伏(特别是海岛站和地球卫星观测)资料直接比较和同化应用开辟了广阔的前景。然而, 尽管本工作所发展的模式对 El Niño 事件中变量场时空演变的模拟已相当成功, 但与已有观测资料相比仍有不少误差, 其中有些可归因于所用的大气强迫场(特别是风应力资料); 有些在于模式本身的不足(如分辨率、物理过程参数化等)。为认识这些误差特征并消除之, 应进行模式和观测资料间的定量比较。同时, 考虑到我们所发展的自由表面 OGCM 同国际上广泛使用的 GFPL 型 OGCM 在动力构成上有很大差别, 也应进行不同模式间的定量比较。这些比较研究将为进一步发展、改进现有模式提供依据。另外, 本文只给出和分析了南方涛动(SO)位相之一的 El Niño 事件的数值模拟, 对 SO 另一位相即反厄尔尼诺(La Niña)数值模拟及 1986 至 1989 年间热带太平洋环流异常物理过程分析将另文给出。

总之, 对本模式的进一步应用和改进正在进行之中, 希望本文工作起抛砖引玉之用, 推动具有重大科学意义和应用前景的热带海洋环流数值模拟和预报研究的开展。

致谢: 感谢曾庆存教授对本工作的指导; 感谢日本气象厅气象研究所 Drs. M. Endoh 和 Y. Kitamura 对本工作的帮助。

参 考 文 献

- [1] Rasmusson, E.M. and T.H. Carpenter, 1982, Variations in tropical sea surface temperature and surface wind stress associated with the Southern Oscillation/El Niño, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 354—384.
- [2] Barnett, T.P., N.Graham, M.Cane, S. Zebiak, S. Dolan, J. O'Brien and D. Legler, 1988, On the prediction of the El Niño of 1986—87, *Science*, **241**, 192—196.
- [3] Inoue, M., and J.J. O'Brien, 1984, A forecasting model for the onset of a major El Niño, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 2326—2337.
- [4] Seager, R., 1989, Modeling tropical Pacific sea surface temperature: 1970—87, *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 419—434.
- [5] Cane, M.A. and S.E. Zebiak, 1985, A theory for El Niño and the Southern Oscillation, *Science*, **228**, 1085—1087.
- [6] Bryan, K., 1969, A numerical methods for the study of the circulation of the world ocean, *J. Comput. Phys.*, **4**, 347—376.
- [7] Philander, S.G.H., and A.D. Seigel, 1985, Simulation of El Niño of 1982—1983, In: J. Nihoul (Editor), *Coupled Ocean-Atmospheric Models*, Elsevier, Amsterdam, pp. 517—541.
- [8] Latif, M. 1987, Tropical ocean circulation experiments, *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 246—263.
- [9] Kousky, V.E., and A. Leetmaa, 1989, The 1986—87 Pacific warm episode: evolution of oceanic and atmospheric anomaly fields, *J. Climate*, **2**, 254—267.
- [10] Harrison D.E., W.S. Kessler and B.S. Giese, 1989, Ocean circulation model hindcasts of the 1982—83 El Niño: Thermal variability along ship-of-opportunity tracks, *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 397—418.
- [11] Zeng, Q.-C., 1983, Some numerical ocean-atmospheric coupling models, Paper presented at the First Internat. Symp. Integrated Global Ocean Monitoring, Tallinn, Estonia, Oct 2—10.
- [12] 张学洪、曾庆存, 1988, 大洋环流数值模式的计算设计, 大气科学, 特刊, 149—165.
- [13] 张荣华、曾庆存、张学洪, 1991, 太平洋大尺度环流数值模拟, I: 数学模式及其性能; II: 长期平均环流; III: 季节变化. 大气科学, 第15卷, 4期, 1—16; 5期, 51—64; 6期, 1—16.
- [14] 张荣华、曾庆存、张学洪, 1991, 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, 第5期, 541—549.
- [15] Zeng, Q.-C., X.-H. Zhang and R.-H. Zhang, 1991, 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.*, **1**, 271—292.
- [16] 张荣华, 1994, 自由表面海洋环流模式正斜压模分解时间积分方案, 大气科学, 第18卷, 第2期, 1—10.
- [17] Zhang, R.-H. and M. Endoh, 1992, A free surface general circulation model for the tropical Pacific, *J. Geophys. Res.*, **97**, 11237—11255.
- [18] 张荣华, 1993, 一个自由表面热带太平洋环流模式及其应用, 待发表.
- [19] Goldenberg, S. B. and J. J. O'Brien, 1981, Time and space variability of tropical Pacific wind stress, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 1190—1207.
- [20] 张荣华, 1993, 热带太平洋平均环流数值模拟, 待发表.
- [21] 张荣华, 1994, 热带太平洋环流季节变化的数值模拟, 大气科学, **18**, No. 6, 674—682.

Simulation of the 1986—1987 El Niño Event with a Free Surface Tropical Pacific Ocean GCM

Zhang Ronghua

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

Abstract

Numerical simulation of the 1986—1987 El Niño event is presented in this paper. Observed atmospheric forcing fields over the periods of 1984—1989 are taken to run an IAP free surface tropical Pacific Ocean general circulation model (OGCM). The space-time evolution of various model variables demonstrates that the model produces interannual variations with reasonable success. Beginning from mid-1986, westerly wind burst over the western equatorial Pacific drives strong eastward surface currents which accomplish the massive transfer of warm surface water. The strong westerly wind in late 1986 excites the pronounced equatorial Kelvin waves which propagate eastward toward the eastern and coastal Pacific where they depress the thermocline and raise sea level twice, and increase sea surface temperature (SST). The eastern Pacific warming occurs primarily due to the diminished cooling contribution of vertical advection whereas in the central Pacific, eastward advection by anomalous zonal flows is the principal mechanism. The El Niño conditions in the eastern Pacific disappear from mid-1987 because of the increase of trade wind there whereas they remain in the central and western Pacific until early 1988.

Key words: free surface OGCM; 1986—1987 El Niño; numerical simulation.