

热带太平洋环流季节变化的数值模拟

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开放研究实验室, 北京 100080)

提 要

在观测到的海表风应力和热量及淡水通量驱动下, 用大气物理研究所发展的高分辨率自由表面热带太平洋环流模式对热带太平洋环流季节变化进行了数值模拟。对模拟得到的热带太平洋海面起伏、温度场和流场等季节变化分析, 比较表明, 模式成功地模拟了观测到的环流季节变化基本特征。其中, 海面起伏中西北太平洋副热带反气旋环流在冬季最强, 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; 北赤道逆流在秋季强而春季弱, 150°W 附近区域赤道表层洋流流向在 4 至 7 月逆转; 赤道东太平洋地区海面温度场春季增暖和秋冷却; 以及次表层赤道斜温层和赤道潜流等相应的季节变化。文中通过与观测和其他模式间的比较及风场敏感性试验进一步考察了模式性能。

关键词: 海洋环流模式; 季节变化; 数值模拟; 模式性能检验; 热带太平洋。

一、引 言

海洋和大气环流的季节变化是最重要的气候演变现象之一, 它与人类生活、生产和工作息息相关。尽管作为海洋和大气环流运动的能源——太阳辐射——具有周期性的季节变化, 但因环流本身动力过程的复杂性和相互作用, 人类对于它的季节变化过程及其机理还认识的很不够。同时, 很多年际气候异常和气候变率是在季节变化的背景下发生、发展和演变的。例如著名的厄尔尼诺(El Nino)现象的发生、发展和消亡过程就同热带太平洋环流的季节演变有着密切关系。在有利的季节变化环境下, 热带东太平洋的海水变暖得以增幅而发展成为厄尔尼诺事件并影响全球气候; 又如, 大气环流中 PNA 遥相关型在北半球的冬季是强的, 而在夏季则是弱的或不存在。因此, 对海洋和大气环流季节变化的研究, 不仅对更深入认识季节变化本身演变规律, 而且对于弄清年际变化和气候异常机理, 达到预测气候异常和变化都具有十分重要的意义。

尽管海洋资料观测是十分困难的, 但根据物理规律和动力学的方程的数值模拟仍为研究环流季节和年际变化提供了可能。Busalacchi 和 O'Brien 用单层约化线性输送模式研究了热带太平洋上层厚度的季节变化^[1]; 基于 Bryan 海洋环流模式^[2], Philander 等^[3], Gordon 和 Corry 等^[4]用环流模式对热带太平洋环流及其季节变化进行了数值模拟。中国科学院大气物理研究所已发展并实现了自由表面海洋环流模式(IAP

1994年2月3日收到, 1994年3月26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。

OGCM), 并且在模式的计算设计、数值求解等方面都有其特色^{[1-2][5-7]}, 并成功地用于太平洋环流季节变化的数值模拟之中^[7-8]。最近, 为了系统地研究热带海洋环流动力学及海气相互作用, 我们又发展了一个高分辨率的自由表面热带太平洋环流模式^[9-10], 并对热带太平洋平均环流进行了系统的数值模拟^[11]。本文将用此模式对热带太平洋环流季节变化进行数值模拟, 并给出与已有观测资料和其他模式间的比较分析。

二、自由表面热带太平洋环流模式简介

本工作的自由表面热带太平洋 OGCM 是在大气物理研究所 OGCM 基础上发展起来的。该模式同国际上常用的 Bryan 模式^[2]有很大差别, 特别是海洋表面作为自由面的处理, 坐标和变量变换, 标准层结扣除, 有效能量守恒和正斜压模分解时间积分方案等, 详见文献^[5-10]。

热带太平洋环流模式区域东西范围从 120°E—69°W, 南北范围从 30°N—30°S; 模式暂未考虑海底形(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。时间积分时正压模步长取为 5min(显示求解), 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^[11]。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 枢温盐方程中包含松弛项。模式的初条件取洋流和海面起伏为零, 温盐用 Lovitus 观测资料^[12]。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)。本文用 Helleman 和 Rosensten 风应力资料^[13], 驱动 OGCM 进行热带太平洋平均环流和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(由月平均资料线性插值到每天)积分 3 年, 得到一个准季节循环的平衡态。本文给出最后一年季节变化结果并进行分析。

三、模式季节变化模拟结果

1. 海面起伏

图 1 是模拟得到的热带太平洋 3 月和 9 月海面起伏分布, 一些引人注目的热带太平洋海面分布平均特征在模式中得到了很好的反映^[14], 如西高东低分布, 经圈方向槽脊结构, 南北太平洋较赤道的不对称性等; 而且也模拟出与已有观测结果^[15]相一致的季節变化。春季, 北太平洋副热带地区水位高, 其南北两侧的等值线密集, 反气旋性环流

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) Zhang Ronghua, Zeng Qingcun and Zhang Xuehong, 1990, A blocking technique for the representation of the bottom topography in an ocean general circulation model, 尚未发表。

强，赤道槽自东向西伸展明显，赤道上东西水位差大。随着季节转换，从春季到秋季，北赤道逆流槽和赤道脊分别向西和向东伸展加强，强度也明显加强，使两者间的经圈方向梯度加大。这些槽脊强度随季节变化在图2上可清楚看到。赤道脊和北赤道逆流槽季节变化位相一致，它们在秋冬季(分别是沿4°N和10°N为很强的脊和槽)，而夏季它们都很弱；赤道槽与赤道脊和北赤道逆流槽位相变化正好相反，前者在春季较强。这些海面起伏槽脊强度的变化与热带海表洋流变动(图2b)有很好的对应关系，并己为观测分析所证实^[15]。

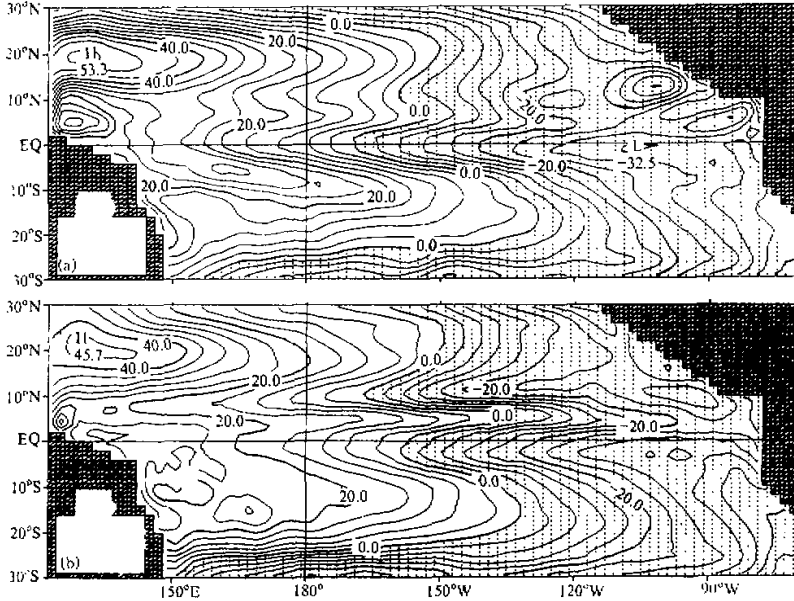


图1 模拟得到的热带太平洋海面起伏分布
(a) 3月; (b) 9月。等值线间隔为4cm, 点区为负海面起伏

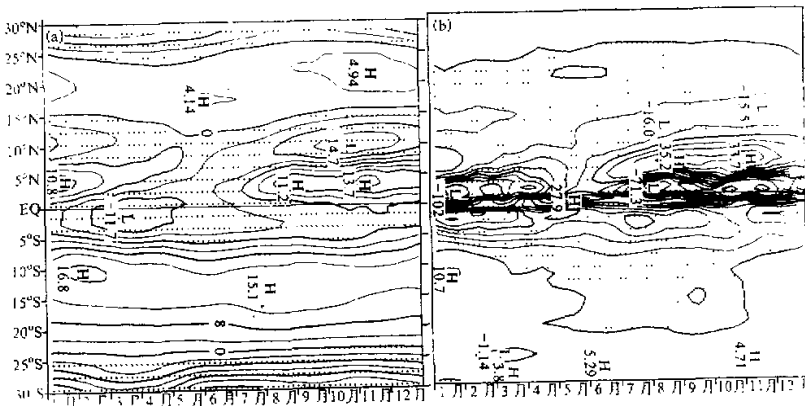


图2 沿155°W经圈方向海面起伏(a)和纬圈洋流(b)随季节变化
海面起伏等值线间隔为4cm, 点区为负海面起伏; 纬圈洋流等值线间隔为10cm/s, 点区表示向西洋流

2. 流场

由于热带太平洋表层信风变化和季风的季节转换, 表层洋流表现出较强的季节变化, 如图 2b 所示的沿 155°W 经圈方向纬圈洋流的时间—纬度剖面图。特别在秋季, 当北太平洋的热带辐合带(ITCZ)最远离赤道的 9 月(位于约 15°N), 北赤道逆流强且范围大; 相反, 当 ITCZ 位于最南位置的 5—6 月(约 2°N), 北赤道逆流几乎不存在。比较图 2a 和 2b 可见, 海面起伏经圈方向槽脊强度(因而它们间的梯度)变化同热带表层洋流变化有非常好的对应关系, 如 9 月海面起伏中沿 4°N 的赤道脊和 10°N 的逆流槽强度达最强, 因而它们间的梯度很大, 对应于强北赤道逆流。

如前所述, 赤道风系和热力结构季节变化较小, 但是表层洋流却有非常大的季节变化, 如图 3b 所示的赤道上表层纬圈洋流的经度—时间剖面图。其最显著的特征是 4—7 月期间赤道中东太平洋(150°W 附近)区域表层洋流流向逆转(即自西向东)现象; 另外, 西太平洋地区, 在年初和年末受赤道西风作用也盛行自西向东洋流。赤道上洋流垂直结构及其季节变化如图 4c、d 所示。其著名特征是存在自西向东的强赤道潜流(EUC)或称 Cromwell 流, 它一般位于向西流动的南赤道洋流(SEC)之下, 中心位置位于强温度梯度的斜温层中(图 4a、b), 向东的强洋流区跨越整个赤道太平洋。赤道潜流的强度在 5 月达最强, 其中心深度也最浅, 春季表层洋流逆转(图 3a)正是由于赤道潜流抬升所致。另外, 在西太平洋地区, 年初(1 至 3 月间), 次表层洋流与 EUC 反向。

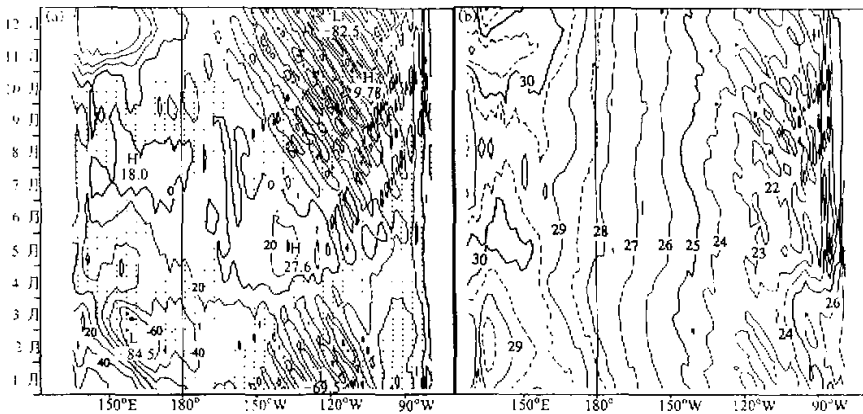


图 3 模拟得到的赤道上海表纬圈洋流(a)和 SST(b)随季节变化洋流
等值线间隔为 20cm / s 点区表示向西流; 温度线间隔为 1°C, 虚线表示, 0.5°C 等值线

3. 温度场

模拟得到的热带太平洋 3 月和 9 月海面温度(SST)分布如图 5 所示。在春季, 赤道东太平洋和南美沿岸的冷水舌强度最弱, 温度最高; 西太平洋暖池位于 10°N—20°S 之间, 最暖区位于南太平洋; 北太平洋较高纬度存在强的南北向温度梯度。随着从冬到夏的季节转换, 整个海洋、大气系统随之北移, SST 场也北移。这时, 西太平洋最暖区移至北太平洋, 西太平洋暖池位于 30°N—10°S, 赤道东太平洋和南美沿岸的冷水舌发

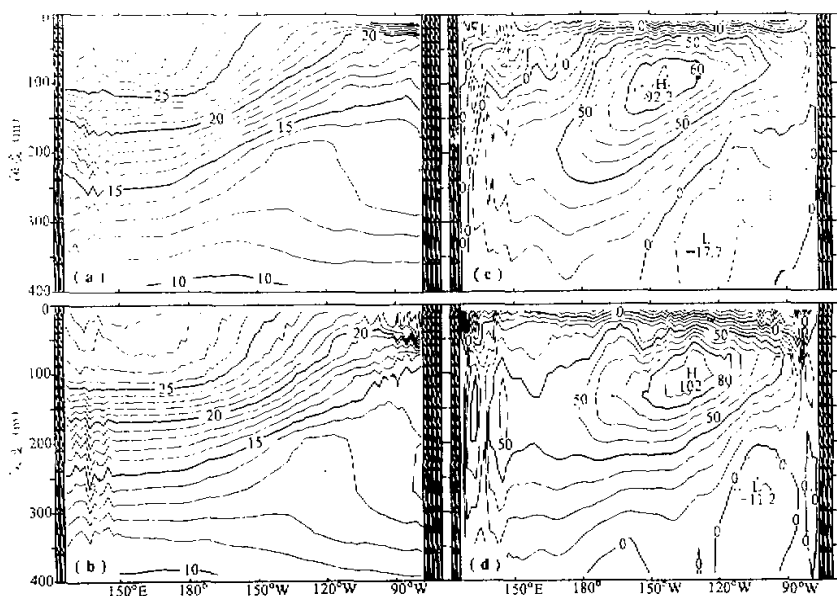


图4 赤道上温度场的深度-纬圈剖面图

温度线间隔为 1°C; 洋流等值线间隔为 10cm / s, 点区表示向西流

(a)表示 3 月份; (b)表示 9 月份和纬圈洋流(c)表示 3 月份; (d)表示 9 月份

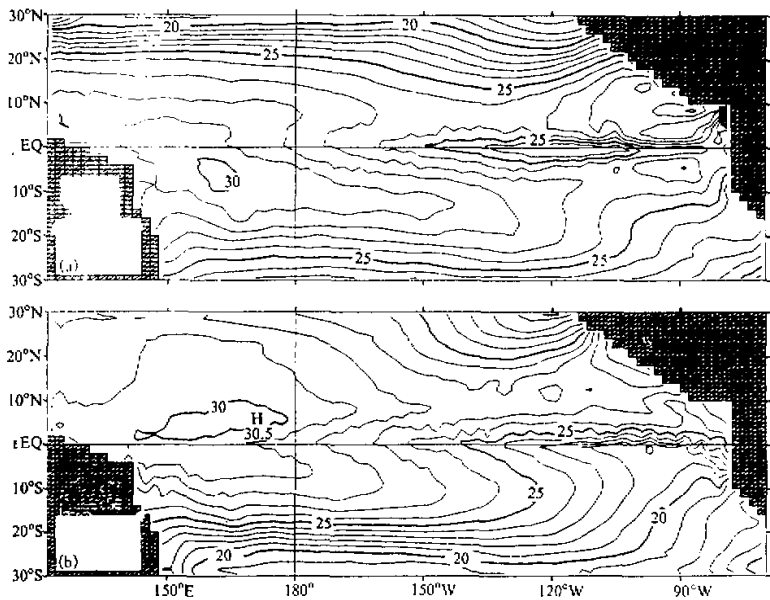


图5 模拟得到的热带太平洋海表温度(SST)分布

(a) 3月; (b) 9月, 等值线间隔为 1°C

展最盛, 那里的温度也最低。

赤道区域受纬圈风分量的强烈影响, 除东西边界地区以外, 所盛行的赤道太平洋信风有一个大而少变的平均值; 同样, 赤道地区热力结构也有一个大的平均纬圈梯度值和较小的季节变化性。赤道上 SST 随季节的变化如图 3b 所示, 最明显的特征是赤道东太平洋的春季增暖和秋季冷却现象。模式 SST 季节变化与观测分析结果^[16]比较一致。

图 4a、b 表示赤道上温度场的深度—纬圈剖面图。温度垂直分布基本特征是存在随深度急剧变化的狭窄区域(等温线密集区)即温跃层, 其上温度较为均匀的混合层, 其下是温度相当均匀的海洋内层。表层混合层在西太平洋是深厚的(大于 100m), 而沿赤道向东逐渐变浅, 到南美沿岸甚至消失, 故斜温层倾斜方向与海面起伏倾斜方向相反(图 1), 存在强的东西向梯度。季节变化特征也在这些图上有所反映, 但不太明显, 如春季东太平洋和南美沿岸增暖(图 4a), 而在秋季则是冷却(图 4b)。

四、模式验证和敏感性试验

1. 与观测资料的比较

上面给出了 IAP OGCM 对热带太平洋环流季节变化模拟结果。为检验模式, 应与实测资料作详细比较。一方面以评估模式性能, 揭示模式存在的误差及可能原因; 同时还可提供模式统计特征以实施更有效的观测资料同化研究。为进一步发展和改进模式奠定基础。然而, 海洋观测资料(特别是表层以下)非常有限, 近年来广泛开展的国际合作和针对热带太平洋的强化观测研究也只能提供有限的测点时间序列资料, 在此给出一些模式与已有观测资料的比较。

Wyrki^[15]根据温盐观测资料详细分析了太平洋海表动力高度季节变化特征; Lovitus^[13]已整编了全球海洋温度、盐度等资料以及一些诊断场。我们的模式结果与这些观测资料是比较一致的(图略), 但主要误差之一是模式模拟的赤道中东太平洋 SST 比观测资料要低。至于洋流仍缺乏详尽的观测资料。图 6a 给出了 1984 年至 1989 年 3 月间季节平均得到的赤道太平洋(140°W)处纬圈洋流随季节演变(资料取自 McPhaden 等^[17]), 对应的模式结果如图 6b 所示。可见, 模式较为成功地模拟出观测到的一些基本

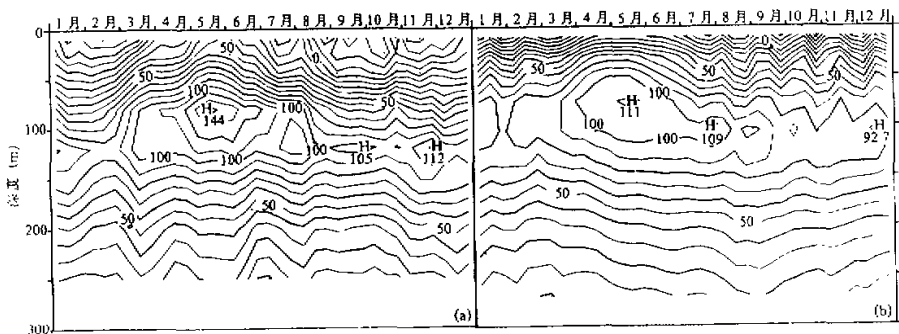


图 6 赤道上 140°W 处纬圈洋流随季节的变化
(a)观测结果; (b)模式模拟结果。等值线间隔为 10cm/s。点区为自西向东流

特征,如表层自东向西的 SEC,次表层斜温层中的 EUC,并且春季 SEC 反向及对应 EUC 的加强和抬升等。但模式 EUC 较实际偏弱,SEC 春季反向流强度不够,自东向西 SEC 垂直深度偏浅。这些模式误差一方面归源于大气风力场,另一方面在于模式本身(如分辨率和物理过程参数化等)的有待于改进。

2. 与其他模式的比较

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,但相对于观测而言仍有很大误差;同时不同研究机构发展的 OGCM 差别也很大。因此,模式研究工作任务之一是考察这些误差和模式差别的性质和原因,以改进模式性能。实现这些目标的有效途径之一是进行不同模式间的比较研究。为此,TOGA(热带海洋和全球大气计划)已成立了 NEG (Numerical Experimentation Group),实施不同 OGCM 间的比较研究计划,考察模式敏感性和模式性能。

用 OGCM 对热带太平洋环流季节变化已有一些研究^[3-4,8],特别是,本文所用的 Hellerman-Rosenstein(以下简称 HR)风应力与 Philander 等模式^[3](以下简称 PHS)和 Gordon 等模式^[4](以下简称 GC)一样,并且模式初条件和时间积分过程等也一样,但 PHS 和 GC 都基于 Bryan 模式^[2],它们与 IAP OGCM 差别很大(第 2 节)。在此简要地介绍一下采用相同 HR 风应力的 IAP OGCM 与 GC 和 PHS 模拟结果间的比较详细结果将另文给出。

GC 分辨率较高(可变网格距,赤道地区经圈方向分辨率为 0.33°;沿岸地区纬圈分辨率为 0.5°;垂直方向分为 16 层,其中表层分辨率为 10m),IAP OGCM 与 GC 差别主要表现在 SST,SEC 强度和垂直厚度,斜温层和 EUC 垂直扩展程度等。例如 IAP OGCM 较 GC 而言,赤道东太平洋 SST 约高 1°,斜温层较强,SEC 强度较弱以及赤道冷水舌向西扩展较弱些。PHS 分辨率极高(赤道 10°N(S)地区经圈分辨率为 0.33°;纬圈分辨率为 1°;垂直方向为 27 层),PHS 和 GC 间比较已有 Gordon 等^[4]给出,IAP OGCM 与 PHS 主要差别在于 SEC 和 SST。例如,PHS 中 SEC 偏强,赤道冷舌向西扩展偏强,使得赤道东太平洋的 SST 较 IAP OGCM 低 1—2°C;另外,尽管 IAP OGCM 分辨率较 PHS 要低得多,但两模式模拟的赤道斜温层强度相当(但 GC 却要弱得多)。总之,这一定性比较表明,尽管 OGCM 采用相同的风应力,但是不同的模式构成,模式间的差别可以较大(可与观测到的季节和年际变率相当)。目前,造成这些模式差别的原因尚不清楚,需进一步分析。初步研究表明,IAP OGCM 能较好地再现斜温层结构在于模式引入标准层结分布及其垂直梯度。

3. 对大气风应力敏感性的试验

上面的比较分析表明 OGCM 采用 HR 风应力模拟的赤道东太平洋 SST 普遍偏低;其他用 HR 风应力资料者也指出,HR 风应力可能偏强。为此,TOGA NEG 建议 HR 风应力乘以 0.75,以进行热带太平洋环流季节变化比较研究。我们也按此重新进行了季节变化数值模拟试验(其他诸如初条件、模式参数、时间积分过程等完全类同)。这一模拟结果与国际上参加这一比较研究计划的其他模式间的比较将另文给出,这里仅给出图 7 所示的赤道上 SST 随季节变化,以说明模式对风应力的敏感性。比较图 7 和图 3b 表明,风

应力减弱后 SST 季节变化基本特征大致上未变, 但赤道东太平洋 SST 增高 1—3°C, 模式 SST 更符合实际观测; 同时也说明, OGCM 确实对风应力场非常敏感。

五、小结和讨论

用所发展的高分辨率自由表面热带太平洋环流模式, 在成功地模拟了观测到的热带太平洋平均环流的基础上^[1], 本文进行了其季节变化的数值模拟。对模拟得到的热带太平洋海面起伏、温度场和流场等季节变化分析, 以及与观测资料比较表明, 模式基本上模拟出观测到的热带太平洋环流季节变化基本特征。但如在热带太平洋平均环流数值模拟所指出的那样^[1], 季节变化模拟也存在一些误差, 主要表现在, 模式模拟场(如海面起伏中槽脊及东太平洋 10°N 处, 所旋性环流, 赤道东太平洋海表温度, 赤道潜流强度和其中心深度等)的季节变率较弱, 赤道东太平洋海表温度比实际偏低 1—2°C; 赤道中、东太平洋海表洋流春季逆转及相伴随的春季增暖太弱。这些模式误差是目前热带海洋环流数值模拟中带普遍性的问题, 为认识这些模式误差的性质和原因, 本文还进行了模式比较和敏感性试验阐明了模拟结果对模式构成和风应力等的敏感性。为更真实地再现观测到的海洋环流及其变化, 在模式设计和数值模拟研究中应重视模式构成和风应力精度。

总之, 虽然中科院大气物理研究所发展的自由表面热带太平洋模式成功地进行了平均环流及其季节变化的数值模拟, 但仍须对模式作进一步的改进、发展和应用。特别是提高赤道地区模式分辨率(如采用水平不等距网格), 引入更真实的海陆和海岛分面以改善模式东西边界和海岛对海布波动反射等现象的正确描述; 采用 Blocking 技术的 η -坐标系取代本工作中的 σ -坐标系, 以正确描述复杂的海底地形。同时, 我们将用此模式进行 1986—1987 厄尔尼诺和 1988 反厄尔尼诺事件、海洋—大气耦合模式及自由表面海洋模式中资料同化试验等研究。

致 谢: 感谢导师曾庆存教授的长期指导和关怀; 本文部分工作是作者获日本国科学技术厅 Fellowship 资助在日本气象厅气象研究所海洋研究部工作期间完成的, 得到该部 Drs. M. Endoh 和 Y. Kitamura 等的热情帮助, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] Busalacchi, A.J. and J.J. O'Brien, 1980, The seasonal variability in a model of the tropical Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 1929—1951.
- [2] Bryan, K., 1969, A numerical methods for the study of the circulation of the world ocean, *J. Comput. Phys.*, **4**,

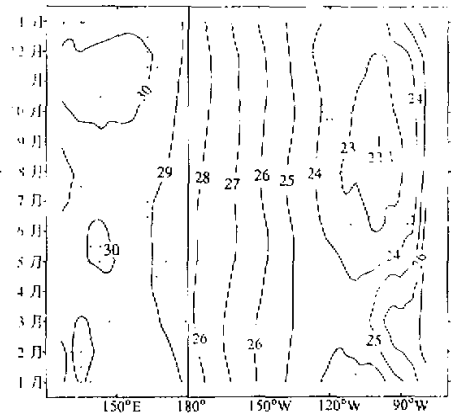


图 7 HR 风应力乘 0.75 后模式模拟得到的赤道 SST 随季节变化
等值线间隔为 1°C

- 347-376.
- [3] Philander, S.G.H., W.J. Hurlin and A.D. Seigel, 1987, Simulation of the seasonal cycle of the tropical Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 1986-2002.
- [4] Gordon, C. and R.A. Corry, 1991, A model simulation of the seasonal cycle in the tropical Pacific Ocean using climatological modeled surface forcing, *J. Geophys. Res.*, **96**, 847-864.
- [5] Zeng, Q.-C., 1983, Some numerical ocean-atmospheric coupling models, Paper presented at the First Internat. Symp. Integrated Global Ocean Monitoring, Tallinn, USSR (Oct.2-10).
- [6] Zhang, X.-H. and X.-Z. Liang, 1989, A numerical world ocean general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, **6**, 44-61.
- [7] 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.
- [8] 张荣华、曾庆存、张学洪, 1991: 太平洋大尺度环流数值模拟, III: 季节变化, *大气科学*, **15**, No.6, 1-16.
- [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, 1993, 一个自由表面热带太平洋环流模式及其应用, *中国科学*, 即将发表.
- [11] Pacanowski, R., and S.G.H. Philander, 1981, Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 1443-1451.
- [12] Levitus, S., 1982, Climatological Atlas of the World Ocean, NOAA Prof. Pap, 13, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., 173PP.
- [13] Hellerman, S. and M. Rosenstein, 1983, Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates, *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1093-1104.
- [14] 张荣华, 1993, 热带太平洋平均环流数值模拟, *海洋学报*.
- [15] Wyrtki, K., 1974, Sea level and seasonal fluctuations of the equatorial currents in the western Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **4**, 91-103.
- [16] Horel, J.D., 1981: On the annual cycle of the tropical Pacific atmosphere and ocean, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1863-1878.
- [17] McPhaden, M.J. and S. Hayes, 1990, Variability in the eastern equatorial Pacific during 1986-1988, *J. Geophys. Res.*, **95**, 13195-13208.

Simulation of Seasonal Variations in the Tropical Pacific Ocean

Zhang Ronghua

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

Abstract

The IAP surface tropical Pacific Ocean general circulation model (OGCM) is used to simulate the seasonal variations in the tropical Pacific forced by the observed surface wind stress, heat and water fluxes. Analyses and comparisons of model results show successful representation of the observed sea level, temperature and currents of the tropical Pacific is strong in the winter, the equatorial trough is strong in the winter and the early spring, whereas the equatorial ridge and countercurrent trough are intense in the fall; the North Equatorial Countercurrent (NECC) is intense during the summer and fall, and the springtime reversal of equatorial surface currents along 150°W is evident; the simulated sea surface temperature (SST) variations are characterised by spring warming and fall cooling in the equatorial eastern Pacific; and there are corresponding seasonal variations in the equatorial thermocline and equatorial undercurrent (EUC). The model performance is further examined and verified by comparisons of model simulations with observations and by sensitivity experiments on the wind stress.

Key words: IAP free surface tropical Pacific OGCM; seasonal variations; numerical simulations; Model performance and verification.