

张志华, 张人禾, 黄刚. 用 OPA9 全球海洋环流模式模拟不同类型 El Nino 事件[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(2): 164-171.

用 OPA9 全球海洋环流模式模拟不同类型 El Nino 事件

张志华¹, 张人禾², 黄刚³

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;
3. 中国科学院 大气物理研究所 东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029)

摘要:根据 El Nino 事件中正的海表面温度异常(sea surface temperature anomaly, 简称 SSTA) 首先出现的区域及其传播特征, 将 El Nino 事件分成 3 种类型, 即东部型、西部型和驻波型。为了研究不同类型 El Nino 事件物理机制的差异, 首先利用高分辨率全球海洋环流模式 OPA9, 对这 3 种不同类型的 El Nino 事件进行模拟。在逐月海表面风应力和热通量的驱动下, 模式模拟出了 1950—2005 年间全球海温演变。模拟结果表明, 模式可以很好地模拟出海洋的气候态, 并且对 El Nino 事件期间的正 SSTA 首先出现的区域以及对正 SSTA 的传播特征都做出了很好的模拟, 成功地模拟了不同 El Nino 事件的发展类型。

关键词: OPA9; 海洋环流模式; El Nino 的不同类型; 数值模拟

中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2009)02-0164-08

Simulation of Different Categories of El Nino Events by Global Oceanic General Circulation Model OPA9

ZHANG Zhi-hua¹, ZHANG Ren-he², HUANG Gang³

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China;
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
3. RCE-TEA, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, El Nino events are classified into three categories: eastern pattern, western pattern and stationary wave pattern according to the region El Nino initially occurs and the propagation features of the positive sea surface temperature anomaly (hereafter referred as SSTA) of El Nino. In order to study the differences of the physical mechanisms of El Nino events, our prime task is to simulate the development process of these various types of El Nino. OPA9, a global oceanic general circulation model with high resolution, is applied to simulate the three categories of El Nino events. Global sea surface temperature changes from 1950—2005 are simulated in this model forced by monthly sea surface wind stress and heat flux. Analysis of the simulation results for the 56 years shows that, the model simulates oceans' climatology very well; in addition, the region El Nino initially occurs and the propagation features of SSTA of El Nino are properly simulated by the model. That is to say, the model simulates the warm events of the three categories successfully.

Key words: OPA9; oceanic general circulation model; different categories of El Nino; numerical simulation

0 引言

ENSO 循环是热带气候系统中最显著的年际变

化现象, 其周期大约为 2~7 a。每当 ENSO 事件发生都会引起世界范围不同程度的大气环流异常, 由此常常会导致严重的干旱、洪涝或者强飓风等气象

收稿日期: 2009-01-05; 改回日期: 2009-03-05

基金项目: 国家海洋专项(908-02-01-02); 国家科技支撑计划项目(2006BAC03B03); 科学院三期创新项目(KZCX2-YW-220); 国家自然科学基金资助项目(40775051; U0733002)

作者简介: 张志华(1976—), 男, 河南新乡人, 博士, 研究方向为海气相互作用, zhangzhihua@nmefc.gov.cn.

灾害。因此,近几十年来,ENSO 一直是国际气象、海洋学界研究的焦点问题之一。

ENSO 循环具有显著的位相锁定和不规则振荡特征^[14]。El Nino 事件一般发生在北半球春、夏季,成熟(赤道中东太平洋最大异常海温出现的阶段)在年底左右。严邦良^[5-7]及 Yan 等^[8]的研究表明,海洋气候基本态的季节变化造成的平流的季节变化是 ENSO 事件成熟位相容易在年底左右出现的机制。赤道太平洋地区赤道辐合带对大气加热的非线性作用使该地区纬向风异常的变化具有位相锁定的特征。这些具有位相锁定特征的纬向风异常强迫出的 Kelvin 波与 Rossby 波通过西边界的反射使它们发生共振也可部分地解释 El Nino 事件容易在春、夏季发生的机制^[9]。

ENSO 事件除了具有位相锁定特征,其周期、振幅及爆发时间等方面存在显著的不规则性特征。一些研究按这些特点将 El Nino 事件进行分类。Quinn 等^[10]、Wang^[11]将 ENSO 事件按强弱分成若干等级。Tomita 等^[12]按照持续时间将 El Nino 事件分成持续两年以上和持续两年以下两种。臧恒范等^[13]、Xu 等^[14]及 Horii 等^[15]把 El Nino 事件以发生的季节进行分类,并探讨了不同季节发生 ENSO 事件可能的原因。

一些研究按正 SSTA 首先出现的区域将 El Nino 事件分成中部型和东部型,例如林学椿等^[16]以 130°W 为界,将正 SSTA 首先出现在 130°W 以西的 El Nino 事件定义为中部型,以东定义为东部型;赵永平等^[17]规定增温首先出现在南美沿岸(90°~80°W,0°~10°S),为东部型,否则为中部型。李晓燕等^[18]将 SSTA 超过 0.5 °C,以 Nino1+2 区(90°~80°W,0°~10°S)或 Nino3 区(150°~90°W,5°S~5°N)开始为东部型,以 Nino4 区(160°E~150°W,5°S~5°N)开始为中部型。

Fu 等^[19]分析 El Nino 事件发展时期的赤道太平洋海温纬向梯度演变过程发现,由于赤道冷舌区(equatorial cold tongue,以下简称 ECT)和赤道暖池(equatorial warm pool,以下简称 EWP)对 El Nino 事件的相对贡献不同,事实上可能存在 3 种赤道增暖类型。第 1 类是中东太平洋大范围增暖,ECT 和 EWP 都有较大贡献。第 2 类主要增暖区限于东太平洋 140°W 以东的南美沿岸区,此时 EWP 萎缩,ECT 起主要作用。第 3 类为整个赤道太平洋增暖,特别是日界线以西明显增暖,EWP 似乎起了主要作用。3 类 El Nino 事件中,最高海温区的位置和东西

海温梯度有明显的不同。特别是第 3 类增暖时,东西海温梯度不是减小而是加大,相应最强赤道对流区的位置、强度和赤道西风的伸展程度都有显著变化。

综上所述,El Nino 事件的演变具有不同的类型,但是产生这些不同类型的机制还不清楚。要弄清这些差异的机制,对这些不同类型 El Nino 事件进行数值模拟是不可缺少的工作,本文使用海洋环流模式来模拟不同类型的 El Nino 事件,为今后研究不同类型 El Nino 事件的形成机制打下基础。

1 数据资料

(1)Levitus^[20]气候月平均海温及盐度资料,水平分辨率为 1°×1°,垂直方向取 14 个标准层:0、10、20、30、50、75、100、125、150、200、250、300、400 及 500 m。

(2)逐月 NCEP/NCAR 再分析表面通量资料集的月平均风应力(经向、纬向风应力分量),及块体方程^[21](bulk formulae)计算表面热通量所需的月平均 2 m 相对湿度、总云盖、降水率、2 m 气温、风速模。2 m 相对湿度和风速模的水平分辨率为 2.5°×2.5°,其他都是高斯网格。时间范围为 1948 年 1 月—2005 年 12 月。

(3)HadISST^[22]再分析月平均 SST 资料,水平分辨率为 1°×1°,选取与 NCEP/NCAR 资料时间跨度相同,即 1948 年 1 月—2005 年 12 月。

2 El Nino 事件的分类

El Nino 事件一般是指 Nino3 区 SSTA 达到或超过 0.5 °C,并持续 6 个月以上。以此为标准,1948—2005 年间共发生 13 次 El Nino 事件,分别是:1951/1952、1957/1958、1963/1964、1965/1966、1968/1969、1972/1973、1976/1977、1982/1983、1986/1987、1991/1992、1994/1995、1997/1998 和 2002/2003 年。

SSTA 的传播是 El Nino 事件的主要特征之一^[23-24]。但是按照正 SSTA 首先出现区域或增暖区范围进行分类,在同一类的 El Nino 事件的传播方向可能发生不一致。如 1994/1995 年和 1997/1998 年 El Nino 事件的海表温度都是首先在赤道中西太平洋变暖,如果按照正 SSTA 首先出现区域^[18]进行分类的话,都属中部型。而事实上两者的正 SSTA 传播特征有显著区别:1994/1995 年 El Nino 事件中正 SSTA 从赤道中西太平洋发展起来后,呈驻波振

荡变化,不再向东海岸发展;而 1997/1998 年 El Niño 事件中正 SSTA 首先在赤道中西太平洋出现,然后向东传播,并在东太平洋得到强烈发展。又如 1965/1966 年和 1982/1983 年 El Niño 事件,按照增暖区范围^[19]划分都可归为第一类,即中东太平洋大范围增暖型,但两者的正 SSTA 传播方向明显不同,1965/1966 年的正 SSTA 首先出现在赤道东太平洋南美沿岸,然后向西传播;1982/1983 年暖事件则是异常暖信号最先出现在赤道中西太平洋,然后东传。

本文在对 ENSO 事件进行分类时,将以正 SSTA 首先出现的区域与其传播特征作为分类的依据。根据这个分类标准可以将 El Niño 事件分成 3 种类型。第 1 种类型是 SST 最先从赤道东太平洋开始变成正距平,然后海温正距平逐渐向西部扩展,称为东部型;第 2 类是正 SSTA 最先出现在赤道中西太平洋,然后向东发展一直到东边界,称为西部型;第 3 类,正 SSTA 最先出现在赤道中西太平洋而后再逐渐向东扩展,但是在中东太平洋呈驻波振荡特征,而不再向东边界发展,称为驻波型。1950—2005 年间的 13 次 El Niño 事件中,属于东部型的有 1951/1952、1965/1966 和 1976/1977 年;属于西部型

的有 1957/1958、1972/1973、1982/1983、1986/1987、1991/1992 及 1997/1998 年;其他为驻波型,包括 1963/1964、1968/1969、1994/1995 和 2002/2003 年。从上述分类可以发现,大多数西部型都是强的暖事件,而东部和驻波型 El Niño 事件一般较弱。为避免合成分析消除过多 El Niño 事件中 SSTA 发展过程的细节特征,本文对 3 种类型的个例进行研究。图 1 给出的是 3 类 El Niño 事件中有代表性的个例,1965/1966 年 El Niño 事件代表东部型,1982/1983 年 El Niño 事件代表西部型,而 1968/1969 年 El Niño 事件是驻波型代表。

图 1a 为典型东部型(1965/1966 年) El Niño 事件赤道太平洋 SSTA 随时间的演变。由图 1a 可以看到,早在 1965 年 2 月,正 SSTA 已经在赤道东太平洋出现,然后海温正异常逐渐增强并且范围从南美沿岸向西扩展,到这一年春季 El Niño 事件爆发,并在年底达到成熟,而这期间内,日界线以西的赤道西太平洋的 SST 都维持着负距平。由 1982/1983 年 El Niño 事件(西部型,图 1b)可知,正的海表温度异常最早出现在赤道西太平洋,然后向东发展,越过日界线以后,迅速在东太平洋得到加强,最

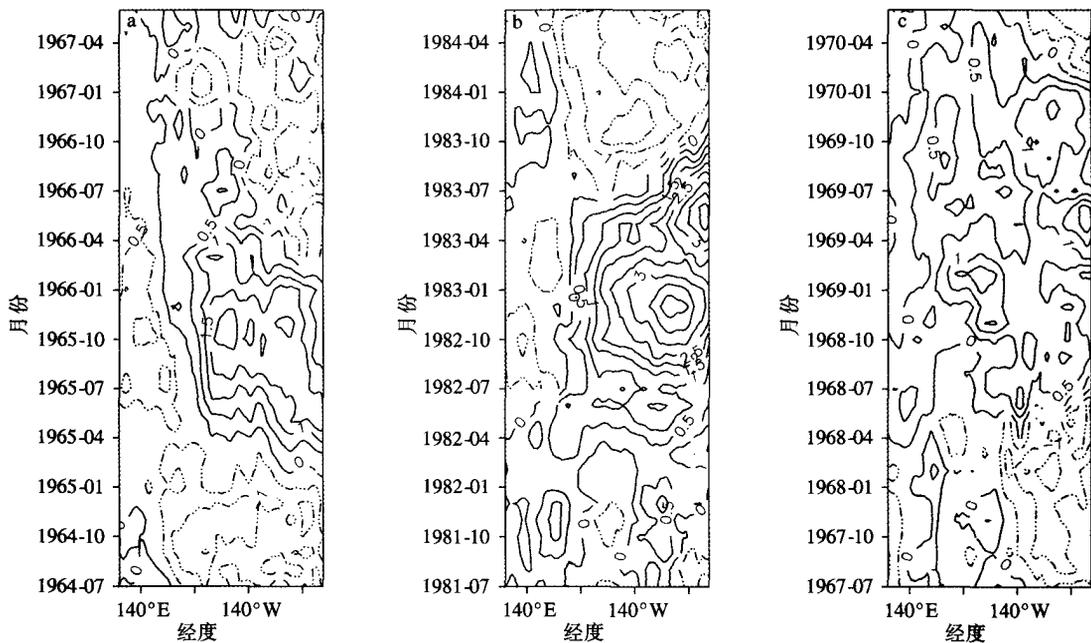


图 1 观测的 (HadISST) 赤道太平洋平均(5°S~5°N) SSTA(°C) 的经度—时间剖面(等值线间隔 0.5 °C)

a. 东部型(1965/1966 年); b. 西部型(1982/1983 年); c. 驻波型(1968/1969 年)

Fig. 1 Longitude-time diagrams of observational (HadISST) equatorial Pacific Ocean (5°S—5°N average) SSTA (units: °C, contour interval is 0.5 °C)

a. eastern pattern(1965/1966); b. western pattern(1982/1983); c. stationary wave pattern(1968/1969)

终形成强的 El Nino 事件。而 1968/1969 年 El Nino 事件(图 1c),虽然正的 SSTA 也是最先出现在赤道西太平洋而后逐渐向东扩展,但是在越过日界线以后,最大正 SSTA 中心只是维持在中太平洋,而不再向东边界发展,表现出明显的驻波型特征,这与 1982/1983 年 El Nino 事件形成鲜明对比。在下面的数值模拟研究工作中,将对上述 3 次 El Nino 事件进行模拟,来检验模式是否能模拟出不同类型的 El Nino 事件。

3 不同类型 El Nino 事件的模拟

3.1 模式简介

本文使用的海洋环流模式是法国 LODYC (Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie) 开发的最新一代全球海洋环流模式——OPA9^[25] (Ocean PARallelise)。OPA9 采用了具有自由表面的原始方程组,垂直方向有 Z 坐标和 S 坐标可选(本文采用了 Z 坐标系),空间差分采用 Arakawa C 型^[26] 网格,时间差分为蛙跳格式。垂直涡动扩散及粘性系数通过一个基于扰动动能诊断方程的 1.5 层扰动闭合方案^[27] 得出;水平动量扩散的粘性系数随经纬度和深度变化;下边界条件使用 Beckmann 等^[28] 的方案,该方案能较精细地刻画海底地形起伏。模式采用了其特有的不规则水平网格系统 ORCA2,经度间隔约为 2°,共 182 个格点;而经向共 149 个格点,在赤道附近是 0.5°间隔,从赤道向两极格点间隔逐渐增加到 2°。该网格在北半球设置了两个极点,分别在西伯利亚和加拿大陆地上,这样做可以有效地消除北极点所引起的计算问题^[29]。在垂直方向上分为 31 层,其中在 5~150 m 深度以约 10 m 为间隔,150 m 以下间隔逐渐加大,最深处为 5 000 m。时间步长为 1 h 36 min,这样 1 d 有 15 步。模式的外强迫包括风应力、热通量及径流量。

3.2 模式对海洋气候态的模拟

把模式的外强迫场(风应力、热通量及径流量)都取成气候月平均值,并将模式从静止状态开始积分,取积分稳定后的 100 a 结果进行分析。

图 2 是模拟与观测的(Levitus)海表温度的气候态。从图 2 可以看到,模式能较好地模拟出主要的热带海洋温度场特征,如西太平洋暖池(SST 超过 28 °C 的海域)、东印度洋暖水区及中美洲沿岸的暖水区及东赤道太平洋冷舌区(SST 低于 24 °C)的范围、强度等。模式模拟大西洋、南太平洋和南印度洋的海温气候态也与观测比较接近。

对赤道太平洋次表层海温的模拟如图 3a 所示,以 20 °C 等温线为斜温层深度的标志来看,斜温层东浅西深,西太平洋斜温层约 150 m 深,东太平洋约 40~50 m 深。暖池区 28 °C 等温线达到约 70 m 深。这些模拟结果都比较接近观测(图 3b)。

3.3 模式对 1950—2005 年间 El Nino 事件的模拟

将 NCEP/NCAR 风应力和表面热通量资料加入到模式中来,作为外强迫场。热通量场根据逐月的 NCEP/NCAR 再分析表面通量资料(2 m 相对湿度、总云盖、降水率、2 m 气温、风速模)计算得出^[21]。以计算气候基本态时的积分结果作初始场,Levitus 的海温和盐度的气候月平均值作为恢复场(restoring)。积分试验从 1948 年 1 月开始,至 2005 年 12 月,一共进行了 58 a,考虑到模式开始积分结果受初值的影响较大,为了消除初值的影响,本文取 1950 年 1 月—2005 年 12 月共计 56 a 的模拟结果进行分析。

图 4 是模拟和观测(HadISST)的 Nino3 指数随时间变化。从图中可以看出,模式很好地模拟出 56 a 所有的 El Nino 事件,而且无论从 El Nino 事件的振幅还是位相来看也都与观测一致。模式对弱 El Nino 事件模拟精度不如强 El Nino,对 La Nina 的模拟精度整体来看不如 El Nino,有些 La Nina 事件没有模拟出来。模拟与观测的 Nino3 指数的相关系数达到 0.87。

为了更进一步检验模式对整个赤道太平洋 SSTA 的模拟能力,本文给出模拟(图 5a)及经过 5 个月滑动平均的观测(HadISST,图 5b)赤道(5°S~5°N 平均)SSTA 的经度—时间剖面。由图 5 可见,模拟的赤道太平洋 SSTA 分布、强度都与观测比较接近,模式对 ENSO 事件 SSTA 不同传播特征也做出了较好的模拟。

3.4 不同类型 El Nino 事件的模拟

为了把模拟的结果和观测结果进行仔细比较,本文给出模拟的 1965/1966、1968/1969、1982/1983 年 El Nino 事件(对其他个例也有同样的结果)沿赤道太平洋 5°S~5°N 平均的 SSTA 的经度—时间剖面(图 6)。与观测相比(图 1a),图 6a 中所示的对东部型 1965/1966 年 El Nino 事件的模拟与观测一致,正的 SSTA 首先出现在赤道东太平洋,并且正的海温异常随时间逐渐向西扩展。分析图 6b 和 6c 可知,模式对西部型和驻波型的模拟也都相当成功,不仅 SSTA 正距平开始区域与观测基本吻合,El Nino 事件发展期间 SST 正距平扩展的方式也得到较好

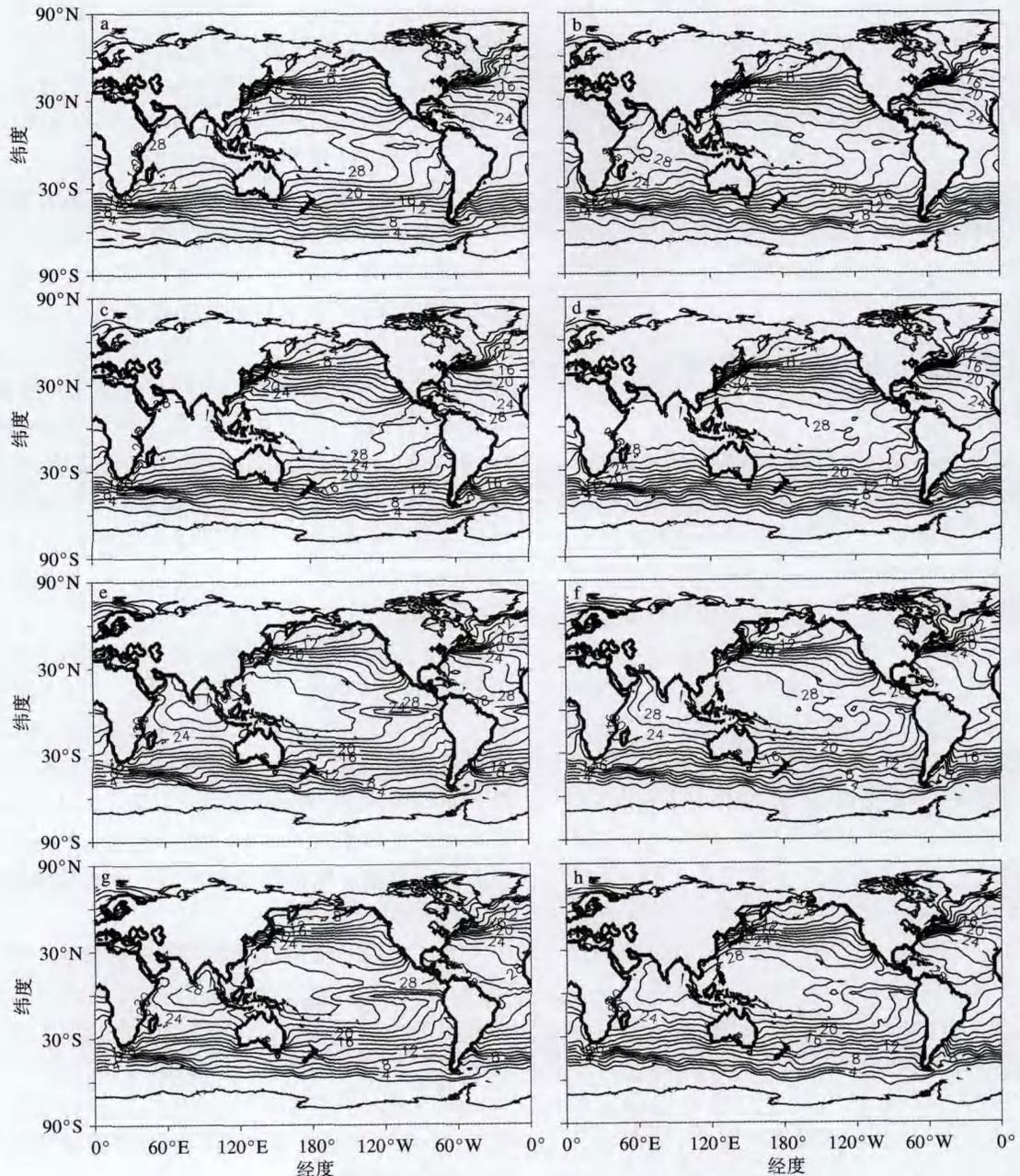


图 2 模式模拟的 100 a 气候月平均 SST(a, c, e, g) 及 Levitus 观测结果(b, d, f, h) (单位: $^{\circ}\text{C}$, 等值线间隔 2°C)
a, b. 1 月; c, d. 4 月; e, f. 7 月; g, h. 10 月

Fig. 2 (a, c, e, g) The model simulated climatological (100 years) SST and
(b, d, f, h) the climatological SST of Levitus (units: $^{\circ}\text{C}$, contour interval is 2°C)
a, b. January; c, d. April; e, f. July; g, h. October

的再现。

4 结论与讨论

根据观测中 El Nino 事件发展过程 SSTA 首先出现的地点及其传播方向, 可以将 El Nino 事件分成 3 类。1950—2005 年间发生的 13 次 El Nino 事件中, 属于东部型的有 1951/1952、1965/1966 和

1976/1977 年, 属于西部型的有 1957/1958、1972/1973、1982/1983、1986/1987、1991/1992 及 1997/1998 年, 而其余的 1963/1964、1968/1969、1994/1995 和 2002/2003 年为驻波型。

本文使用一个全球海洋环流模式 OPA9, 对这 3 种类型的 El Nino 事件进行数值模拟。模拟结果表明, 模式可以模拟出 1950—2005 年间所有的 13 次

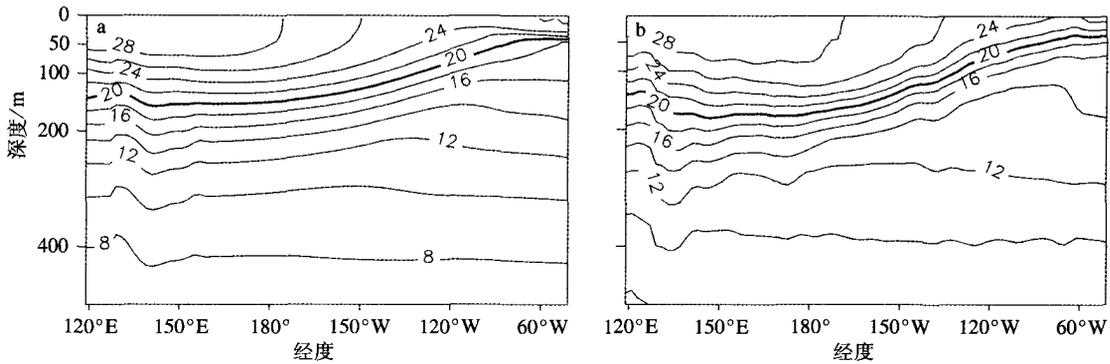


图 3 平均赤道太平洋次表层海温(5°S~5°N 平均)模式模拟结果(a)及 Levitus 观测结果(b)
(单位:℃;等值线间隔 2℃;加粗线为 20℃等温线)

Fig.3 Annual mean 5°S—5°N average subsurface sea temperature in the equatorial Pacific
(units:℃,contour interval is 2℃,20℃ isotherm is indicated as a thick line)
a. model simulation;b. observation(Levitus)

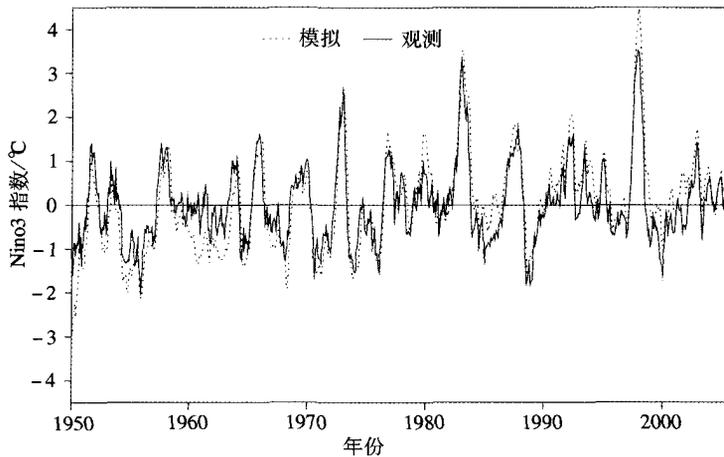


图 4 模式模拟的(点线)与观测的(HadISST,实线)1950—2005 年 Nino3 指数(单位:℃)
Fig.4 Time series of the model-simulated(dotted) and observational(HadISST,solid) Nino3 index
for the period from 1950—2005(units:℃)

El Nino 事件。模拟的 Nino3 指数的位相和振幅都与观测一致,相关系数达到 0.87。但是总体来看,模式对弱 El Nino 事件模拟精度不如强 El Nino 事件,而对 La Nina 事件的模拟整体来看不如 El Nino 事件。模式模拟结果中正 SSTA 首先出现的地点及其传播特征都与观测事实相吻合。

张志华等^[30]指出不同类型的 El Nino 事件对我国夏季气候异常产生不同的影响。要解释为什么会产生不同的气候异常响应,就很有必要深入研究产生不同类型 El Nino 事件本身的物理机制。这将在以后的工作中进行。

致谢:感谢法国 LODYC (Laboratoire d’Océanographie DYnamique et de Climatologie, <http://www.lodyc.jussieu.fr/opa>) 提供模式源代码。

参考文献:

- [1] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Nino[J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(5): 354-384.
- [2] Chang P, Wang B, Li T, et al. Interactions between the seasonal cycle and the southern oscillation-frequency entrainment and chaos in an intermediate coupled ocean-atmosphere model[J]. Geophys Res Lett, 1994, 21(25): 2817-2820.
- [3] Tziperman E, Zebiak S E, Cane M A. Mechanisms of seasonal—ENSO interaction[J]. J Atmos Sci, 1997, 54(1): 61-71.
- [4] An S I, Wang B. Mechanisms of locking of the El Nino and La Nina mature phases to Boreal winter[J]. J Climate, 2001, 14(9): 2164-2176.
- [5] 严邦良. El Nino 事件成熟位相锁定在年底的物理过程研究[J]. 大气科学, 2004, 28(4): 481-492.
- [6] 严邦良. 海洋平流的季节变化对 La Nina 事件成熟位相锁定的

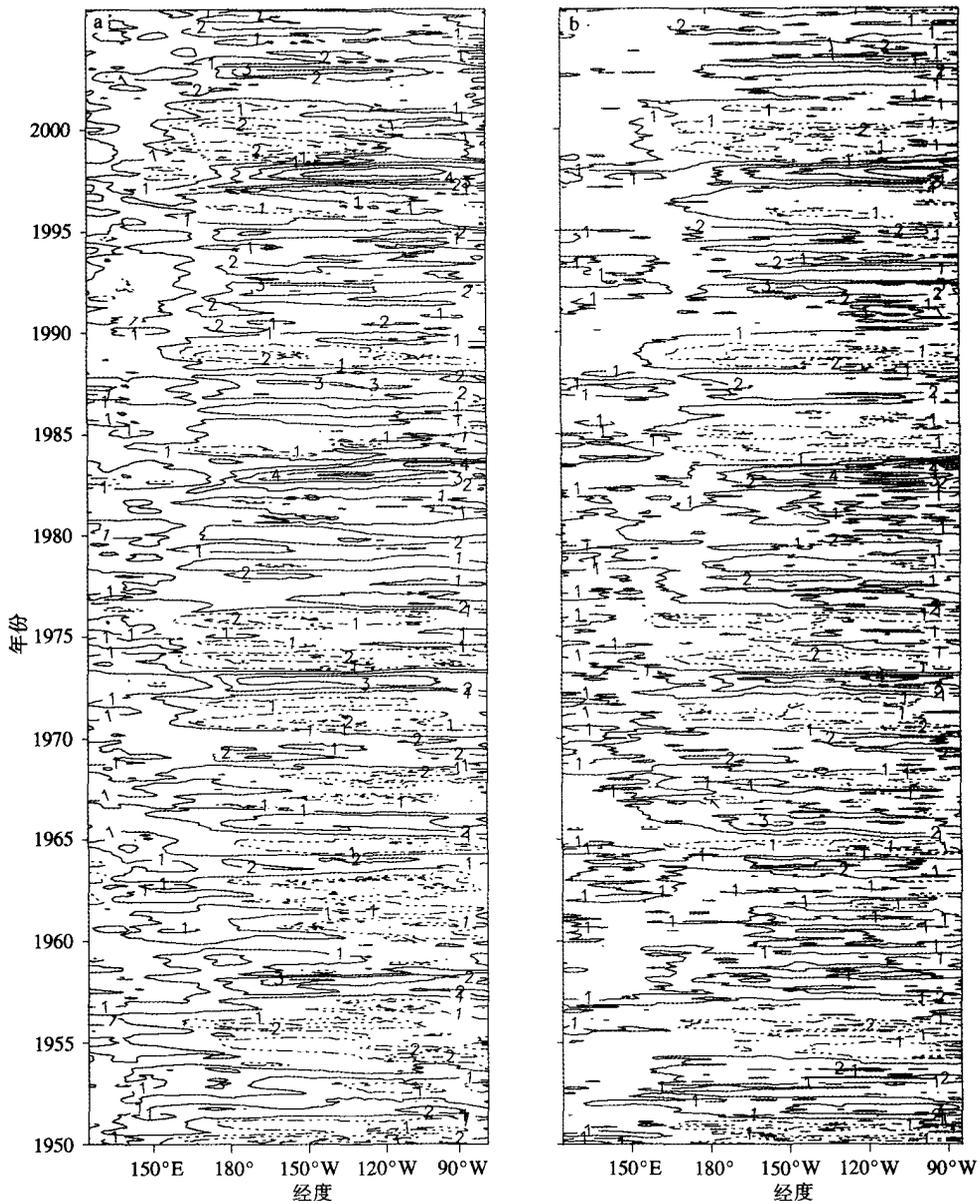


图 5 1950—2005 年赤道太平洋 5°S ~ 5°N 平均 SSTA(°C) 的经度—时间剖面(单位:°C, 等值线间隔 1 °C)

a. 模式模拟; b. 观测(HadISST)

Fig. 5 Longitude-time diagrams of 5°S—5°N average SSTA(°C) in the equatorial Pacific Ocean for the period from 1950—2005(units: °C, contour interval is 1 °C)

a. model simulation; b. observation(HadISST)

- 作用[J]. 大气科学, 2005, 29(2): 283-291.
- [7] 严邦良. 海洋垂直平均速度影响 ENSO 事件成熟位相锁定的物理过程[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(5): 691-697.
- [8] Yan B, Wu R. Relative roles of different components of the basic state in the phase locking of El Niño mature phases[J]. J Climate, 2007, 20(15): 4267-4277.
- [9] Yan B. On the mechanism of the locking of the El Niño event onset phase to Boreal spring[J]. Adv Atmos Sci, 2005, 22(5): 741-750.
- [10] Quinn W H, Neal V T, Antunez de Mayolo S E. El Niño occurrences over the past four and a half centuries[J]. J Geophys Res, 1987, 92(C13): 14449-14461.
- [11] Wang S. Reconstruction of El Niño event chronology for the last 600 year period[J]. Acta Meteor Sinica, 1992, 6(1): 47-57.
- [12] Tomita T, Yasunari T. On the two types of ENSO[J]. J Meteor Soc Japan, 1993, 71(2): 273-284.
- [13] 臧恒范, 王绍武. 1854—1987 年期间的埃尔尼诺与反埃尔尼诺事件[J]. 海洋学报, 1991, 13(1): 26-34.
- [14] Xu J, Chan J C L. The role of the Asian-Australian monsoon system in the onset time of El Niño events[J]. J Climate, 2001,

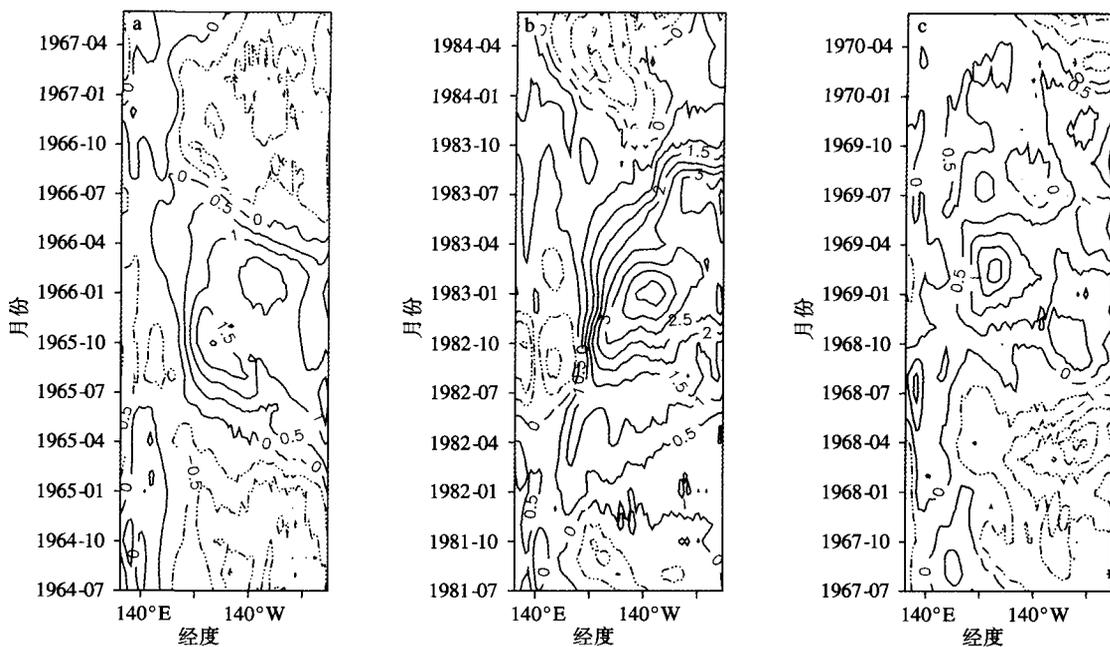


图6 模式模拟的赤道太平洋(5°S~5°N平均)SSTA(°C)的经度—时间剖面(单位:°C,等值线间隔0.5 °C)

a. 东部型(1965/1966年);b. 西部型(1982/1983年);c. 驻波型(1968/1969年)

Fig. 6 Longitude-time diagrams of model-simulated 5°S—5°N average SSTA(°C) in the equatorial Pacific Ocean(units: °C, contour interval is 0.5 °C)

a. eastern pattern(1965/1966); b. western pattern(1982/1983); c. stationary wave pattern(1968/1969)

14(3):418-433.

[15] Horii T, Hanawa K. A relationship between timing of El Nino onset and subsequent evolution[J]. Geophys Res Lett, 2004, 31, L06304, doi:10.1029/2003GL019239.

[16] 林学椿,于淑秋.厄尔尼诺与我国汛期降水[J].气象学报, 1993, 51(4):434-441.

[17] 赵永平,陈永利.一百多年来 ENSO 事件分类和 ENSO 循环研究[J].海洋湖沼学报, 1998, 3(1):7-12.

[18] 李晓燕,翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究[J].气象学报, 2000, 58(1):102-109.

[19] Fu C, Diaz H F, Fletcher J O. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114(9):1716-1738.

[20] Levitus S. Climatological atlas of the world ocean[R]. US Dept of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1982.

[21] Oberhuber J M. An atlas based on the COADS dataset: The budgets of heat, buoyancy and turbulent kinetic energy at the surface of the global ocean[R]//Tech Rep, 15, Max-Planck Institut fur Meteorologic. 1988.

[22] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. J Geophys Res, 2002, 108(D14), 4407, doi:10.1029/2002JD002670.

[23] Huang Ronghui, Zang Xiaoyun, Zhang Renhe, et al. The westerly anomalies over the tropical Pacific and their dynamical effect on the ENSO cycle during 1980—1994[J]. Adv Atmos Sci, 1998, 15(2):135-151.

[24] 张人禾,黄荣辉. El Nino 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用: I. 资料诊断和理论分析[J]. 大气科学, 1998, 22(4):587-599.

[25] Madec G, Delecluse P, Imbard M, et al. OPA 8.1 ocean general circulation model reference manual [R]. Notes du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace, France, 1998.

[26] Arakawa A. Computational design for long-term numerical integrations of the equations of atmospheric motion[J]. J Comput Phys, 1966, 1(1):119-143.

[27] Blanke B, Delecluse P. Variability of the tropical Atlantic Ocean simulated by a general circulation model with two different mixed-layer physics[J]. J Phys Oceanogr, 1993, 23(7):1363-1388.

[28] Beckmann A, Döcher R. A method for improved representation of dense water spreading over topography in geopotential-coordinate models[J]. J Phys Oceanogr, 1997, 27(4):581-591.

[29] Madec G, Imbard M. A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity[J]. Climate Dyn, 1996, 12(6):381-388.

[30] 张志华,黄刚. 不同类型 El Nino 事件及其与我国夏季气候异常的关系[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(6):782-789.

(责任编辑:马奋华)