

智海, 王盘兴, 俞永强, 等. 2009. 一个海洋-大气-动态植被耦合模式评估——海洋环流模拟 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 131-142.  
Zhi Hai, Wang Panxing, Yu Yongqiang, et al. 2009. Evaluation of a ocean-atmosphere-dynamic vegetation coupled model—Simulating ocean circulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 131-142.

# 一个海洋-大气-动态植被耦合模式评估 ——海洋环流模拟

智海<sup>1,2</sup> 王盘兴<sup>1</sup> 俞永强<sup>2</sup> 丹利<sup>3</sup> 徐永福<sup>4</sup> 郑伟鹏<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

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

4 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 利用中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 的全球耦合模式 (GOALS-AVIM), 进行了 100 年积分。利用后 40 年的结果对模式耦合植被动态过程 (AVIM) 前后输出的海洋物理场对比分析。结果表明: 耦合 AVIM 后的模式可以合理地模拟全球海洋温盐环流的气候态、季节变化, 可以改进模式的模拟效果, 在一定程度上克服了耦合 AVIM 前模式的缺点, 使模拟结果更接近实测。由于植被-大气的双向作用, 在季节变化的模拟中, 9 月的改进效果大于 3 月的, 北半球大于南半球; 对于年平均气候态, 耦合 AVIM 后的模式结果在热带海区海表面温度 (SST) 的模拟效果得到了明显改善, 尤其是赤道太平洋海区的海温偏低现象得到了改善; 在年际变化的模拟中, 改善了耦合 AVIM 前模式模拟的年际变化分布, 加大了赤道太平洋的标准差的模拟, 使得耦合 AVIM 后模拟的年际变化大于耦合前; 增强了耦合模式对赤道太平洋 ENSO 的模拟能力, 较耦合 AVIM 前的模式模拟出了更多的 ENSO 基本特征, 也改善了耦合 AVIM 前 ENSO 变化周期偏弱、偏短的现象; 同样改善了对气候系统中存在的相互作用的模拟, 对于热带印度洋 SST 变化与赤道太平洋 SST 的相互关联的模拟中, 更加真实地模拟出了气候系统中存在的相互关联关系, 体现出了 AVIM 动态植被过程对气候耦合模式的改善。

**关键词** 耦合模式 动态植被 双向作用 海洋环流 模式评估

**文章编号** 1006-9585 (2009) 02-0131-12 **中图分类号** P461+.2 **文献标识码** A

## Evaluation of a Ocean-Atmosphere-Dynamic Vegetation Coupled Model —Simulating Ocean Circulation

ZHI Hai<sup>1,2</sup>, WANG Panxing<sup>1</sup>, YU Yongqiang<sup>2</sup>, DAN Li<sup>3</sup>, XU Yongfu<sup>4</sup>, and ZHENG Weipeng<sup>2</sup>

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

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

3 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

4 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**收稿日期** 2008-05-07 收到, 2009-01-10 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新重要方向项目 KZCX2-YW-214、国家自然科学基金资助项目 40605025、40730106、40675049 和国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400506

**作者简介** 智海, 男, 1966 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事气候变化研究。E-mail: zhihai@mail.iap.ac.cn

**Abstract** Using coupled model (GOALS - AVIM) developed in IAP/LASG, simulating experimentation has been integrated 100 a, and the mean results of the later 40 integration years suggest that the model coupled with AVIM basically reproduce main features of annual mean climatologic state, seasonal cycle and interannual change. Based on comparing analysis between coupled AVIM and without AVIM further, the results show that the model with AVIM can improve simulation of ocean physical fields, and correct mistake of coupled without AVIM in a considerable degree. Results of coupled with AVIM agree well with the observation and this makes a solid foundation for the two-way feedback between land and atmosphere in the coupled model. Owing to the two-way feedback of AVIM, simulation of seasonal cycle coupled with AVIM is improved obviously in the Northern Hemisphere, in September particularly. Simulation of mean climatologic state coupled with AVIM is improved on sea surface temperature (SST) of equatorial Ocean comparing with coupled without AVIM as correcting negative-difference of SST without AVIM in equatorial Pacific Ocean significantly. As to simulation of interannual variety, the simulation coupled without AVIM is improved replacing model coupled with AVIM, and model coupled with AVIM increase standard deviation in equatorial Pacific Ocean such that simulation of interannual variety coupled with AVIM is higher than that of coupled without AVIM. Model coupled with AVIM has the preferable capability of simulating ENSO comparing with model coupled without AVIM by reason that model coupled with AVIM can describe further essential characteristic of ENSO and correct shortcoming of weaker and shorter ENSO periods. Moreover, as to correlation of simultaneity between in the Indian Ocean SST and Niño3.4 index of the equatorial Pacific Ocean, model coupled with AVIM can improve simulation of interaction of climatology, and correlation coupled with AVIM is more close to observation. All above reveal that coupled model with AVIM can advance simulating capability of climate change.

**Key words** coupled model, dynamic vegetation, two-way feedback, ocean circulation, model evaluation

## 1 引言

对于全球不断变暖的今天,耦合模式已成为研究气候变化必不可少的工具,目前广泛应用于气候和全球环境变化的研究和预测(陈克明等,1996;周广庆,1996;俞永强,1997;王在志等,2005a,2005b)。在耦合模式中,陆面分量模式、海洋分量模式及大气分量模式对模拟全球气候变化有重要的反馈作用。揭示各模式的协调变化,将有助于利用耦合模式来预测气候异常。中国科学院大气物理研究所(IAP)的大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)从1993年开始研制、发展了一个包括海洋、大气和陆面相互作用的全球耦合环流模式(Global Ocean-Atmosphere-Land System Model),称为GOALS模式(Zhang et al.,1996;Wu et al.,1996;Liu et al.,1996,1997,1998;Liu et al.,1998;俞永强等,1998;吴统文等,2004a),实现了一个完整的海洋-海冰-大气-陆面耦合系统模式(GOALS)(吴国雄等,1997)。

随着模式分辨率的提高和物理过程改进, Ji

(1995)提出了植被-大气相互作用模式(AVIM)。AVIM中植被的变化由植被生长模式计算,因而随气候而改变,实现了大气与植被的相互作用过程(季劲钧等,1999)。这一陆面模式克服了传统模式由于单向耦合带来的模式不确定性和系统误差,能够更好地刻画气候与生态的双向反馈过程及其时间变化。目前AVIM已经与IAP/LASG的IAP/LASG L9R15大气环流模式完成了物理过程的耦合(Dan et al.,2002)和生物过程的耦合(Dan et al.,2005),实现了陆气相互作用的双向耦合。双向耦合能更真实地体现植被在气候模式中的反馈作用,植被在陆气相互作用方面扮演着重要的角色。地表植被的变化改变了下垫面的特征如粗糙度和反照率等,极大地影响了地面的能量平衡和地气间的通量传输,继而通过边界层的气象条件变化对大气环流起到反馈和调节作用(丹利,2003)。本文把一个含有动态生物植被过程模式(AVIM),即植被与大气相互作用模式与IAP/LASG的9层大气环流模式AGCM及20层的OGCM-ML20.4海洋模式耦合成为全球模式(GOALS-AVIM),进行相应的海洋环流场模拟的评估分析。

## 2 模式介绍

中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室发展的海-气-陆耦合气候系统模式 (GOALS-AVIM), 包括了大气、海洋、动态植被过程等 3 个子模式。其中大气部分为一谱模式, 水平方向为菱形 15 波截断, 其水平分辨率为  $7.5^\circ$  (经度)  $\times 4.5^\circ$  (纬度); 在垂直方向采用  $\delta$  坐标, 分为不等间距的 9 层。大气模式耦合了一个动态植被过程模式 (AVIM), 分辨率为  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ , 模式包括 3 层土壤和 1 层植被, 主要包括物理交换子模块、植物生长子模块和物理参数转换子模块。物理交换子模块根据土壤、植被以及大气连续体内的质量和能量守恒来决定状态量的变化 (Ji et al., 1989)。植物生长子模块包括了植物完整的光合作用、呼吸作用、分配、凋落以及物候过程 (Lu, 1999)。由于大气模式分辨率较低, 所以采用了垂直方向单位网格嵌套耦合的办法, 具体的耦合过程和原理参见文献 (Dan et al., 2002)。

耦合模式的海洋分量模式 (ML20) (Zhang et al., 1992) 采用自由面的原始方程格点模式 (Zeng et al., 1989), 模式的水平分辨率为  $4^\circ$  (经度)  $\times 5^\circ$  (纬度), 模式的边界和海洋地形是根据 Gates et al. (1975) 的  $1^\circ \times 1^\circ$  的数据产生的, 模式在垂直方向上不等距分为 20 层, 最大深度为 5 500 m, 最重要的特色是采用了温度和盐度纬向平均的标准层结扣除, 纬向平均的温度和盐度数据是由 Levitus (1982) 的资料插值得到的。

海洋模式主要由表面风应力、热通量和淡水通量来驱动, 模式中用到的海表热通量是用 Haney 型 (Haney, 1971) 公式计算得到。海洋与大气耦合, 采用日通量距平耦合方案 (俞永强等, 1998), 海洋和大气不仅通过其界面交换动量和热量, 还进行淡水通量的交换, 从而实现物理过程完整的海气相互作用 (周天军等, 2000)。

本文主要利用 GOALS-AVIM 耦合模式, 在植被-大气双向作用下对耦合模式的海洋输出场分析。耦合模式的初始场利用各个分量模式的平衡态作为耦合模式的初始场, 耦合 AVIM 前后的模式分别积分 100 年, 对输出的后 40 年结果进行分

析。利用模式模拟的海洋温盐结构的气候态、年际变化等方面及耦合模式海洋物理场的时空变率评估动态植被过程对耦合模式性能的影响。

## 3 模拟结果分析

AVIM 包含着大气、植被、土壤之间的物质和能量交换过程 (Ji, 1995), 其中生物物理过程和植物生理过程相互作用构成一个系统, 大气和植被间的相互作用建立在完全动态、内部协调的互动过程基础上 (季劲钧等, 1999)。重要的是, 在 AVIM 中, 植被的季节变化不是人为给定的, 而是由植物生长模式决定的, 因而其随气候变化而改变, 实现了大气与植被的相互作用过程 (吕建华等, 2002)。耦合时, 大气模式提供辐射量、降水及底层变量以驱动陆面过程模式。而陆面过程模式所计算的地表面变量则被用于计算大气模式中的表面通量和辐射收支 (吴国雄等, 1997)。在大气环流子模式中所需的海表温度 (SST) 和海冰分布直接由海洋环流模式给定。海洋模式所需的要素场包括海表风应力和进入海洋的净热通量等则取大气模式计算的日平均值 (吴统文等, 2004b)。所以在耦合模式中, 陆面模式通过大气模式与海洋模式发生作用。

通过比较模式与 AVIM 耦合前后的海洋物理场的模拟, 来评估 AVIM 对耦合模式模拟结果的影响。

### 3.1 耦合 AVIM 前后海洋场气候态、季节变化及年际变化模拟的比较

#### 3.1.1 季节变化模拟对比

海表温度 (SST) 特别是赤道太平洋的 SST, 与全球气候异常有密切的关系, 因此对 SST 的模拟就成为衡量一个耦合模式能力的重要标志之一 (俞永强, 1997)。图 1 和 2 分别是耦合 AVIM 前后的 3 月和 9 月 SST 季节分布及与 WOA01 观测值的差异。选取 3 月和 9 月作为冬季和夏季的代表月份, 是因为海洋对外界的大气强迫和辐射强迫的响应大约会滞后 1~2 个月 (俞永强, 1997)。同观测相比, 两种模式都合理地模拟出 SST 的季节空间分布型, 如赤道西太平洋暖池和东太平洋冷舌的位置和强度都与观测比较接近。可以发现, 冬季暖池的主体位于南半球, 夏季暖池的主体则

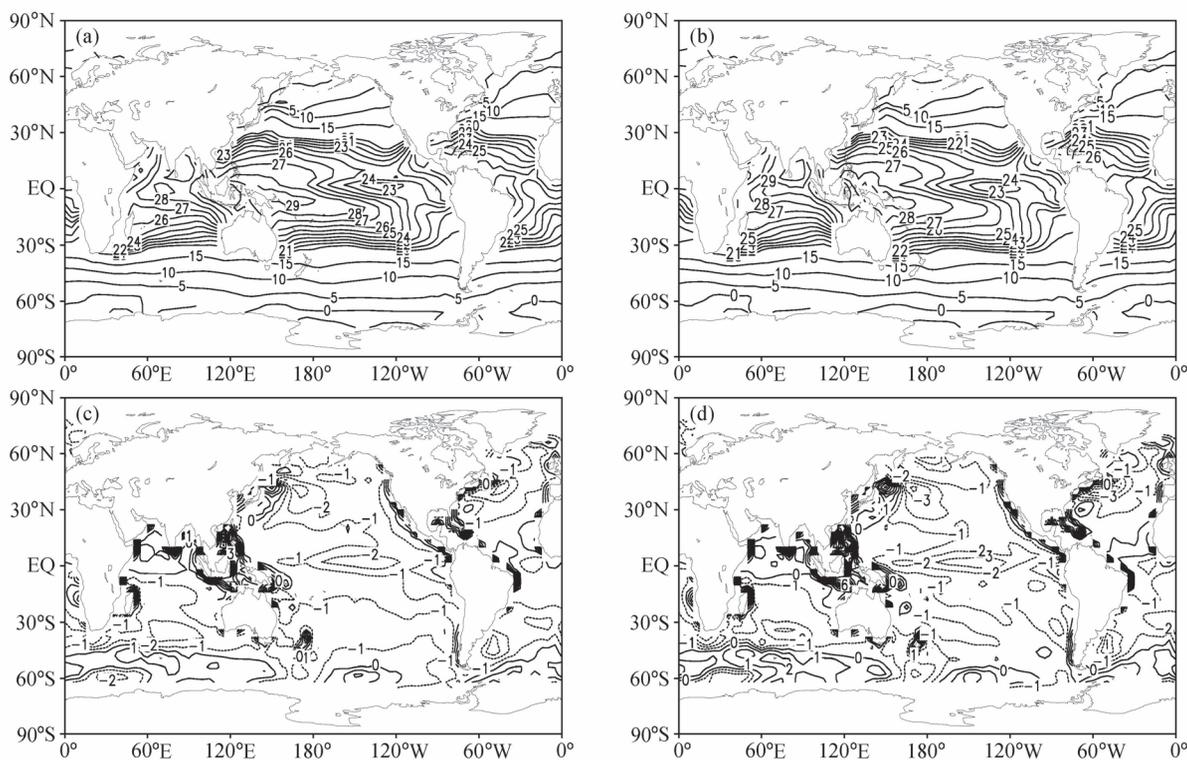


图1 全球3月月平均海洋表面温度:(a)耦合 AVIM后;(b)耦合 AVIM前;(c)耦合 AVIM后与 WOA01 海洋观测资料差值场;(d)耦合 AVIM前与 WOA01 海洋观测资料差值场(单位:°C)

Fig.1 Global monthly mean sea surface temperature in Mar: (a) with AVIM; (b) without AVIM; (c) difference between coupled with AVIM and observation data of WOA01; (d) difference between without AVIM and observation data of WOA01 (units: °C)

位于北半球;赤道东太平洋的冷舌也显示出冬季弱、夏季强的特点,这都说明耦合 AVIM 前后模拟的季节变化基本上都是合理的。

比较耦合 AVIM 前后与观测值的偏差,可以看到两个模式模拟结果的区别。3月(图 1c 和 1d),耦合 AVIM 后比耦合前在大部分海区模拟的 SST 升高,负偏差减小,尤其是在北太平洋,耦合前最大值为  $-4^{\circ}\text{C}$ ,偏差区在耦合后降低到  $-3^{\circ}\text{C}$ ,而且  $-3^{\circ}\text{C}$  偏差区域也在耦合后缩小;同样在北大西洋负偏差中心值也由耦合 AVIM 前的  $-3^{\circ}\text{C}$  降低到耦合后的  $-2^{\circ}\text{C}$ ;改善效果最明显区域位于赤道太平洋,SST 的模拟效果由于耦合 AVIM 后明显得到了改善,  $-3^{\circ}\text{C}$  的偏差消失,  $-2^{\circ}\text{C}$  偏差区域面积东缩减小。正偏差出现在大洋沿岸,耦合 AVIM 前后没有明显的变化,这可能是低分辨率海洋模式本身的缺陷(刘海龙, 2002)。在南半球,由于地形主要以海洋为主,耦合 AVIM 前后, SST 的模拟没有明显的改善。9月(图 2c 和 2d)是北半球的夏季,两个模式模拟

的 SST 与观测值的偏差与 3 月的分布特点大致相同,但改善的程度较 3 月更明显,最明显的是东太平洋冷舌区。比较耦合 AVIM 前后,耦合后 SST 增温幅度加大,负偏差减小。在北太平洋、北大西洋和太平洋赤道地区,耦合 AVIM 后明显地改善了耦合前 SST 模拟偏低的现象,使位于北太平洋和北大西洋的  $-5^{\circ}\text{C}$  偏差减小到了  $-4^{\circ}\text{C}$ ;在赤道太平洋海域,耦合 AVIM 消除了  $-3^{\circ}\text{C}$  偏差,使赤道太平洋海区的 SST 模拟负偏差减小,尤其是改善了模拟的赤道东太平洋冷舌伸到日界线以西(观测的冷舌基本上位于日界线以东)的现象。

通过分析,模式由于耦合了 AVIM,改善了 SST 季节变化模拟,尤其 9 月的改善好于 3 月,北半球好于南半球。这是因为北半球的陆地面积较南半球多,而 AVIM 是通过陆气的相互作用影响耦合模式,加之,北半球 9 月的植被生长较 3 月茂盛,对于具有植被-大气双向作用的 AVIM,可以通过陆气的通量交换改善大气分量模式的物

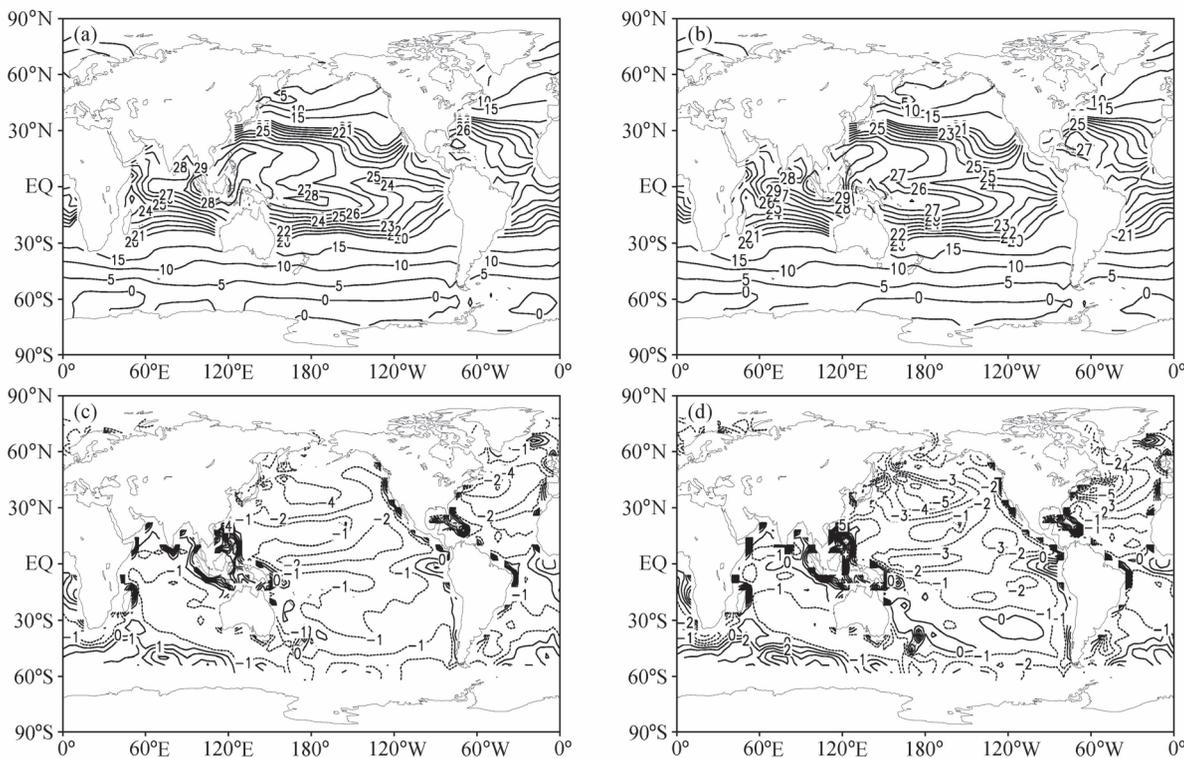


图2 同图1，但为9月  
Fig. 2 Same as Fig. 1, but for Sep

理量场的模拟，继而通过海气相互作用改善了耦合模式海洋场的模拟。同时由于海洋模式的低分辨率，在耦合模式中所出现的赤道东太平洋冷舌过于狭窄地集中在赤道附近，且向西伸展过多，这就使得西太平洋东西方向的温度梯度比观测强得多，实际上这也是大多数海洋模式的通病，可能与模式的分辨率和扩散过程有关（俞永强等，2001）。还可以看出耦合 AVIM 前后的模拟与观测资料相比，赤道海域偏冷，而南大洋、太平洋和大西洋中纬度的西边界流都偏暖，赤道印度洋偏暖。赤道印度洋暖池的温度偏高。比较耦合 AVIM 前后的模拟差异（图 3c 和 3d）可见，对于耦合 AVIM 后，在西北太平洋和西北大西洋模拟的 SST 最大偏差为  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与耦合前相同；在南大洋的海岸边缘耦合前后的结果与观测资料的偏差相似，在南大洋的印度洋部分最大偏差可达  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，太平洋和大西洋部分偏差值为  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与耦合前相比，只是偏差值的区域和数值略小；两个模式的主要区别在中低纬度的海区，耦合后位于中东赤道太平洋的偏差区域比耦合前的缩小，而耦合前  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  偏差区横贯东西赤道太平洋；位于赤道以南的海区，耦合后小于  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  偏差区东延，

### 3.1.2 年平均气候态的模拟比较

图 3 为耦合 AVIM 前后模拟的全球年平均 SST 和与观测资料的年平均 SST 偏差。可以看到两个模式基本模拟出了全球上层海洋 SST 年平均气候态和地理分布特征，赤道太平洋东西方向的温度梯度、暖池和冷舌的位置也基本合理，模式也把西太平洋暖池的北伸及中高纬地区的海温分布特征都模拟出来了。但两个模式的模拟结果同观测资料相比，存在着不同的偏差。由于动态植被双向作用的性质，导致 AVIM 对植被生长和分布比较敏感（丹利，2003），耦合 AVIM 的模式

对年平均气候态模拟的改善效果不如对季节变化的模拟改善明显。其中，耦合 AVIM 前后模拟的冷舌过于狭窄地集中在赤道附近，且向西伸展过多，这就使得西太平洋东西方向的温度梯度比观测强得多，实际上这也是大多数海洋模式的通病，可能与模式的分辨率和扩散过程有关（俞永强等，2001）。还可以看出耦合 AVIM 前后的模拟与观测资料相比，赤道海域偏冷，而南大洋、太平洋和大西洋中纬度的西边界流都偏暖，赤道印度洋偏暖。赤道印度洋暖池的温度偏高。比较耦合 AVIM 前后的模拟差异（图 3c 和 3d）可见，对于耦合 AVIM 后，在西北太平洋和西北大西洋模拟的 SST 最大偏差为  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与耦合前相同；在南大洋的海岸边缘耦合前后的结果与观测资料的偏差相似，在南大洋的印度洋部分最大偏差可达  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，太平洋和大西洋部分偏差值为  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与耦合前相比，只是偏差值的区域和数值略小；两个模式的主要区别在中低纬度的海区，耦合后位于中东赤道太平洋的偏差区域比耦合前的缩小，而耦合前  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  偏差区横贯东西赤道太平洋；位于赤道以南的海区，耦合后小于  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  偏差区东延，

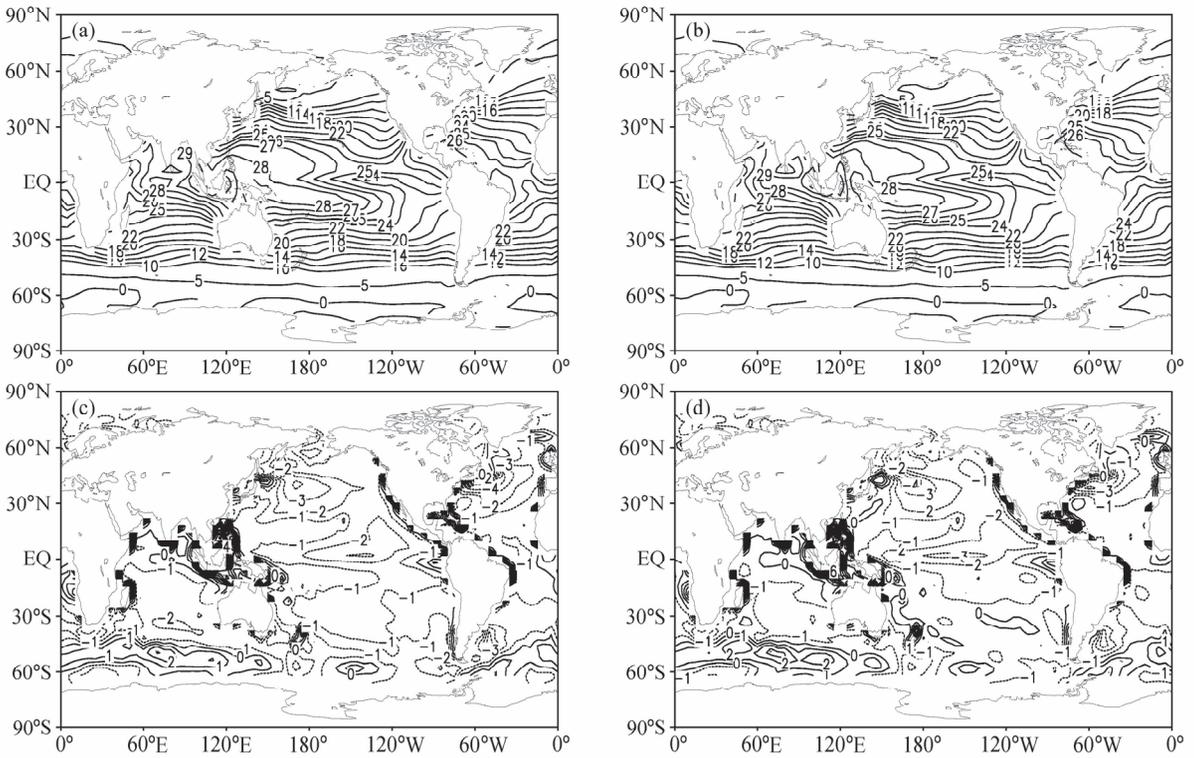


图3 同图1, 但为年平均

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for annual means

比耦合前的偏差小。相比耦合 AVIM 前后的模式结果, 热带海区的 SST 模拟效果得到了明显改善, 尤其在赤道太平洋海区的海温偏低现象得到了改善, 偏差减小。同样对年平均气候态的模拟, 耦合 AVIM 前后模式中不同程度地存在着赤道东太平洋冷舌偏强西伸、赤道中太平洋偏冷、东太平洋南美沿岸偏暖的现象, 在其他耦合模式中也是普遍存在的, 可能与东太平洋上空的层云参数化过程有关 (Mechoso et al., 1995)。

### 3.1.3 年际变化的模拟比较

标准差反映了不同区域物理量的时间变率。图4为耦合 AVIM 前后及观测资料的标准差分布, 海温观测资料采用 Reynolds et al. (1994) 月平均全球 SST 资料。耦合 AVIM 前后模拟的 SST 年际标准差最大的地区是南极洲与大洋洲之间的高纬度海域、赤道太平洋及以北的海区。在南极大陆周围冰水过渡带地区, 海温年际变化的标准差也较大, 都明显的比观测值偏大; 耦合 AVIM 后, 偏差降低了  $0.3^{\circ}\text{C}$ 。赤道日界线以西的区域, 最大值都约为  $0.4^{\circ}\text{C}$ , 对于大值区, 耦合后的  $0.3^{\circ}\text{C}$  的区域西伸扩大。除赤道地区外, 北太平洋和北

大西洋海温年际变化也较大, 基本都在  $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ , 耦合 AVIM 后在北太平洋达到了  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 而耦合前为  $0.4^{\circ}\text{C}$ 。高纬度的海洋边界地区, 年际变化标准差大的原因可能与海水的年际变化有关。在北冰洋大部分区域, 由于海面终年被冰覆盖, 海温的年际变化比较小。比较而言, 耦合 AVIM 的模式标准差的数值在北太平洋比耦合前增大, 在南太平洋减小。两个模式在大洋洲南部的大值中心的数值都大于观测值, 但耦合后比耦合前偏大的程度减小。耦合 AVIM 前后都没有模拟出日界线以东的大值中心, 耦合后的北太平洋和北大西洋 SST 年际变化标准差比耦合前的区域增大, 向观测靠近。高纬度的海洋边界地区, 耦合前后模拟的都比观测大, 这可能是与海冰的年际变化有关。比较而言, 耦合 AVIM 后改进了模式模拟北太平洋和北大西洋标准差偏低和南大洋偏高的现象。但耦合的海洋模式的分辨率偏低, 导致耦合 AVIM 前后模式模拟赤道东太平洋 SST 年际变率的能力都较差 (刘海龙, 2002)。

比较耦合 AVIM 前后的年际变率, 发现耦合 AVIM 后模式标准差的数值改进了位于北太平洋

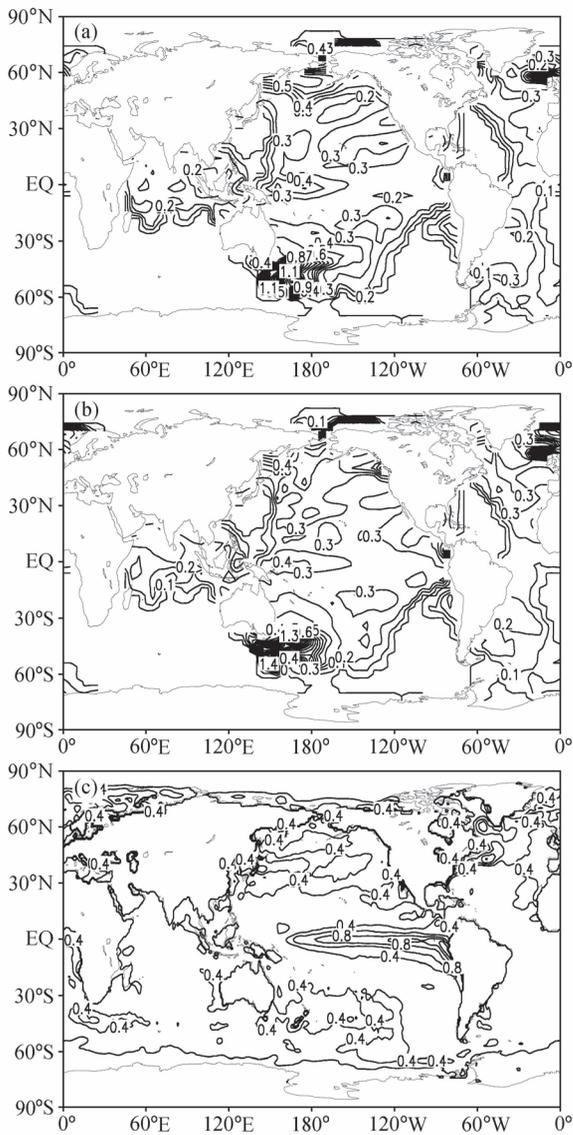


图4 全球 SST 的标准差分布: (a) 耦合 AVIM 后; (b) 耦合 AVIM 前; (c) 观测资料 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
Fig. 4 Standard deviation of global SST interannual variability: (a) with AVIM; (b) without AVIM; (c) observation data of WOA01 (units:  $^{\circ}\text{C}$ )

和北大西洋 SST 标准差偏低和南大洋偏高的现象, 但由于模式的分辨率偏低导致耦合 AVIM 前后都对赤道东太平洋 SST 年际变率的模拟能力较差。

### 3.2 ENSO 事件模拟比较

能够模拟出显著的年际变化是耦合模式的一个重要特点, 也是所有耦合模式的目的之一 (陈克民, 1994), 评估模式性能优劣的一个重要方面就是检验它对热带区域年际变化的模拟能力 (俞

永强, 1997)。目前世界上已经有不少耦合模式都可以在一定程度上重现 ENSO 循环的一些特征 (Meehl, 1990; Zhang et al., 1992; Neelin et al., 1992; 陈克明等, 1997; 俞永强, 1997), 但其中许多细节还不完全与观测一致 (Rasmusson et al., 1982)。下面就 GOALS-AVIM 模拟的热带太平洋区域 SST 的年际变化作评估分析。

图 5 是耦合 AVIM 前后模拟的赤道太平洋 Niño3.4 区 ( $4^{\circ}\text{S}\sim 4^{\circ}\text{N}$ ,  $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$ ) SST 距平 (SSTA) 的时间-经度剖面, 资料长度为 480 个月。从图中可以明显地看到模式模拟的 SSTA 的年际变化异常, 赤道中东太平洋地区的冷暖事件不规则地交替出现。对于耦合 AVIM 的模式 (图 5a), SST 异常在中、东太平洋上表现最为明显, 最大达到  $\pm 1.6^{\circ}\text{C}$ , 比观测的小 (Yukimoto et al., 1996)。另外, 从冷暖事件的演变过程来看, 观测的 SSTA 异常有向西传的也有向东传的, 一般 SSTA 最先出现在东太平洋, 然后向西传播, 在日界线以西达到极大值, 但模式只能模拟出向西传播的异常事件。事实上, 其他许多低分辨率的海气耦合模式亦有类似的结果 (Latif et al., 2001), 由于耦合模式的海洋分量模式水平分辨率只有  $4^{\circ}$  (经度)  $\times 5^{\circ}$  (纬度), 因此模式仅能模拟出向西传播的 SSTA, 不能描述东传的 Kelvin 波 (陈克明等, 1997), 因为一旦赤道中太平洋出现 SST 异常, 能量无法向东太平洋频散, 只能在局地加强, 最终导致了在赤道中太平洋区域模拟的 SSTA 过强 (俞永强, 1997)。而耦合前的结果显示, 模拟的 SSTA 正的最大值可达  $1.2^{\circ}\text{C}$  左右, 最大负距率为  $-1.4^{\circ}\text{C}$ , 都比耦合 AVIM 后偏小, 且其中心不再位于日界线以西约  $160^{\circ}\text{E}$  处, 模拟的冷暖事件不规则地交替发生频次小于耦合后, 西传的特征不明显。

比较耦合 AVIM 前后的模拟结果, 耦合后模拟的 SSTA 最大值大于耦合前, 且其中心大都位于日界线以西约  $160^{\circ}\text{E}$  处。但也有一些数值稍小的距平中心位于赤道东太平洋, 而其比耦合前更能表现西传的特征。这表明模式耦合后, 改善了对赤道太平洋 SST 年际变化的模拟。为了更全面地分析热带太平洋的年际变化特征, 分别计算耦合 AVIM 前后 Niño3.4 区域平均逐月 SSTA 的时间序列的功率谱, 分析赤道东太平洋和中太平洋

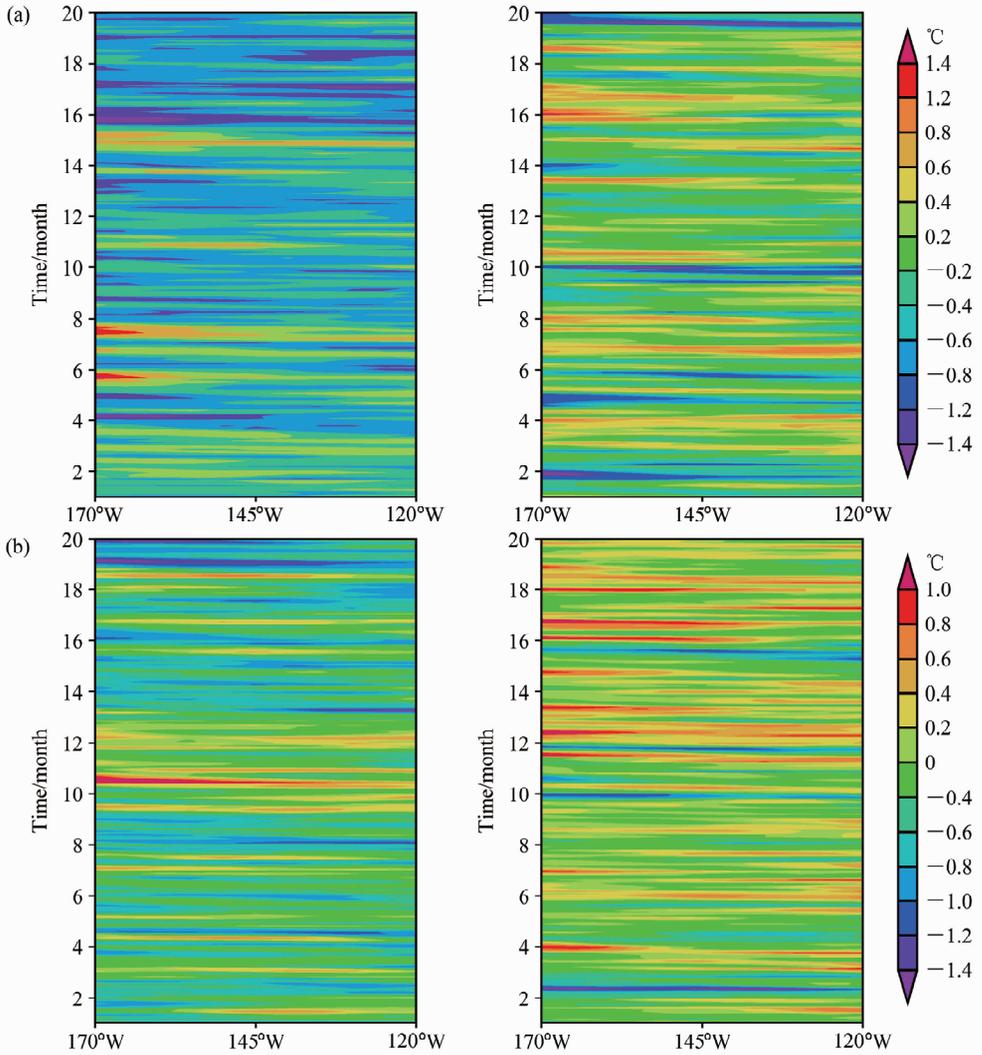


图5 赤道太平洋 Niño3.4 区平均逐月 SST 距平时间-经度剖面: (a) 耦合 AVIM 后; (b) 耦合 AVIM 前

Fig. 5 Temporal-longitude mean monthly SST anomaly distribution in Niño3.4 of equator Pacific: (a) with AVIM; (b) without AVIM

SSTA 时间变化的特征。

通过比较耦合 AVIM 前后模式模拟的东太平洋 Niño3.4 逐月的时间序列功率谱分析可以看到, 耦合后的 Niño3.4 区时间序列通过噪声检验的谱段为 20~80 个月 (图 6a), 谱密度的峰值对应周期为 48 个月; 而耦合前相同区域的时间序列 (图 6b) 通过噪声检验的谱段为 20~40 个月, 最大峰值对应的时间为 36 个月, 而且其谱密度的峰值小于耦合后的模式。以上说明, 尽管耦合 AVIM 前后的模式都可以模拟出海洋固有的 2~4 年的年际周期变率, 但耦合后模拟的 Niño3.4 区年际变化信号的信噪强度大于耦合前; 通过红噪声检验的谱段可看出, 耦合前较耦合后窄。

由以上讨论可知, GOALS 耦合 AVIM 后能

模拟出观测的 ENSO 循环的许多基本特征。尽管还存在不少缺陷, 但与耦合 AVIM 前的模拟结果相比, 对模式模拟还是有很大的改进。这说明气候系统模式耦合了动态植被模式后, 能更好地反映陆面的真实植被变化。通过植被-大气双向作用, 把对气候模式影响的时间变率反馈到海洋模式中, 使海洋物理场能更真实地反映赤道太平洋 SST 年际变化, 因此也是耦合 AVIM 模式的海洋系统响应气候系统的年际变化信号明显的原因。

### 3.3 印度洋 SST 年际变化对 ENSO 响应的模拟比较

对印度洋月平均 SSTA 进行 EOF (Empirical Orthogonal Function) 分析的结果表明 (李东辉等, 2005), 印度洋 SST 存在着整个海盆尺度一

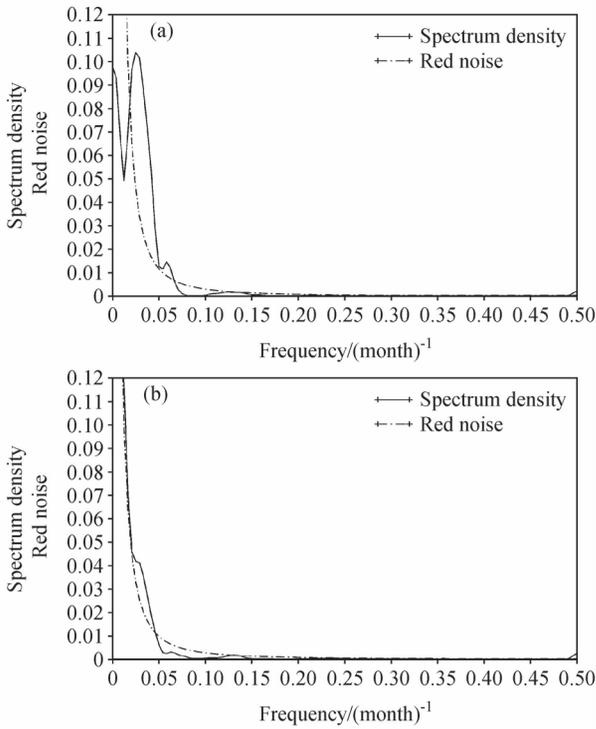


图6 赤道太平洋 Niño3.4 区 SSTA 的月平均 SST 时间序列的功率谱密度函数和对应红噪声曲线：(a) 耦合 AVIM 后，(b) 耦合 AVIM 前  
Fig. 6 Power spectrum of monthly SSTA in Niño3.4 of equator Pacific: (a) coupled with AVIM, (b) coupled without AVIM

致变化的第一模态。相关研究 (Bottomley et al., 1990; Wallace et al., 1998; Venzke et al., 2000) 发现，热带印度洋 SST 的变化可能来自赤道东太平洋 SSTA 的强迫，存在着时间滞后关系。ENSO 信号是印度洋年际变率的一个重要组成部分，赤道东太平洋 SST 变化将导致印度洋中部约一个季度后出现大范围的正相关区 (Webster et al., 1999; Saji et al., 1999; 周天军等, 2004)。

分析耦合 AVIM 前后印度洋 40 年月平均 SSTA 的 EOF 分解第一模态时间系数与太平洋 Niño3.4 指数的相关关系，可以得出印度洋 SST 一致变化对赤道太平洋海温周期变化的响应关系。图 7 为耦合 AVIM 前后及观测的 Niño3.4 指数和印度洋 SST 一致变化的交叉相关，得出耦合 AVIM 前后太平洋 Niño3.4 指数和印度洋一致性变化都存在着超前的相关关系。耦合 AVIM 后通过检验的相关系数对应的时间为超前 7~8 个月 (图 7a)，表明太平洋的 Niño3.4 指数的变化周期超前印度洋一致性变化的周期 8 个月左右。而对

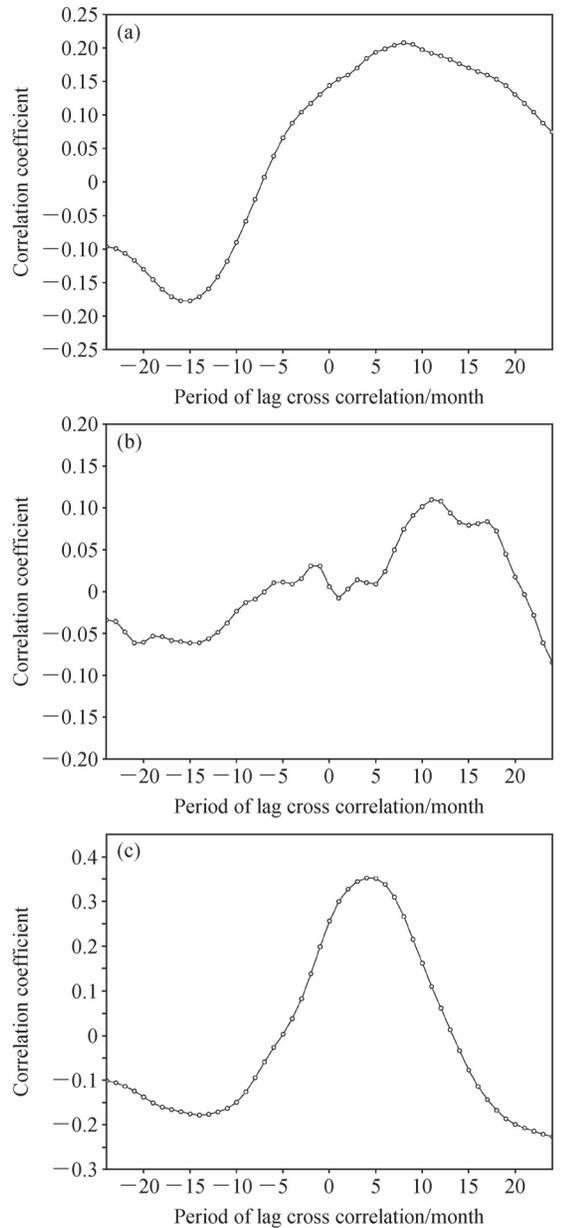


图7 热带印度洋区域平均 SSTA 一致变化与 Niño3.4 指数的交叉相关：(a) 耦合 AVIM 后；(b) 耦合 AVIM 前；(c) 观测资料  
Fig. 7 Cross correlation between equinoctial Indian SSTA uniform change and Niño3.4 index: (a) with AVIM; (b) without AVIM; (c) observation data

耦合 AVIM 前的模式模拟结果得出的太平洋 Niño3.4 指数变化周期超前印度洋一致性变化的最大周期 10 个月左右，但不显著 (图 7b)。相比观测资料的相关分析，太平洋的 Niño3.4 指数变化超前印度洋一致性周期变化约 4~5 个月 (图 7c)，观测资料正相关的超前时间周期比耦合

AVIM 前后的都小。由此可见,耦合后的模式改善了耦合前印度洋 SST 变化对赤道太平洋响应的模拟,加大了其联系的相关性。造成这个差异的原因可能是耦合 AVIM 前模拟太平洋 ENSO 的信号较弱,导致印度洋 SST 变化的响应相应减弱,使得模式中不同区域的 SST 年际变化相关性减弱。耦合 AVIM 后加强了模式模拟的 ENSO 年际变化信号,由于 AVIM 的植被-大气双向作用,使得耦合模式内部的印度洋 SST 年际变化与赤道太平洋 SST 变化的关联与观测资料更加相符。

## 4 结论

利用中国科学院大气物理研究所 LASG 的海洋-大气-动态植被耦合模式积分结果,评估了 GOALS-AVIM 模式对海洋物理场的模拟效果。通过耦合 AVIM 前后的年平均气候态和季节变化、ENSO 的时空特征、印度洋 SST 对赤道太平洋 SST 变化的响应等对比分析。得出以下结论:

(1) 通过与 AVIM 耦合前后的 SST 季节变化、年平均气候态和年际变化的模拟比较,表明耦合 AVIM 模式可以改善耦合 AVIM 前的模拟效果,具有陆面动态植被过程的耦合模式可以合理地模拟全球海洋温盐环流的气候态、季节变化,在一定程度上克服了耦合 AVIM 前的模式缺点,模拟结果更接近实况,由于植被-大气的双向作用,使得在季节变化的模拟中 9 月的改进效果大于 3 月,北半球大于南半球,充分体现了植被变化对模式的影响;在年际变化的模拟中,加强了对赤道太平洋标准差的模拟,使得耦合 AVIM 后模拟的年际变化大于耦合前。通过对比还表明耦合 AVIM 的模式年际变率在一些海域要强于耦合前,表明耦合模式更明显地模拟出海洋物理场的年际变化特性。

(2) 通过对 ENSO 模拟及印度洋 SST 的一致变化与赤道太平洋 Niño3.4 区 SST 变化的响应模拟对比分析,得到:模式耦合 AVIM 后,由于动态植被过程双向作用的特点,改进了耦合模式的地气通量交换,通过大气影响到海洋的模拟,使得对于 ENSO 事件的模拟比耦合 AVIM 前更能反映出 ENSO 固有的基本特征。尽管耦合 AVIM 前后的模式都可以模拟出海洋固有的 2~4 年周期变

率,但耦合后信号的信噪强度大于耦合前,耦合前通过红噪声检验的谱段比耦合后窄,耦合后模拟出的周期与观测更相符;缩小了耦合 AVIM 前印度洋 SST 的变化响应赤道太平洋 Niño3.4 的周期,改善了耦合模式对气候系统间关联的模拟,加大了耦合模式内部年际变化的相关性。由于 AVIM 的植被-大气双向作用,使得耦合模式内部印度洋 SST 年际变化与赤道太平洋 SST 变化的关联与观测资料更加相符。

## 参考文献 (References)

- Bottomley M, Folland C K, Hsiung J, et al. 1990. Global ocean surface temperature Atlas (GOSTA) [M]. Norwich, England: Her Majesty's Stn. Off., 333pp.
- 陈克民. 1994. IAP 全球海气耦合环流模式的改进及温室气体的变化引起的气候变化的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 107pp. Chen Keming. 1994. Improvements of IAP coupled global ocean-atmosphere general circulation model its simulation of climate change induced by increasing greenhouse gases [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 107pp.
- 陈克明, 张学洪, 金向泽, 等. 1996. 一个海洋大气环流耦合模式及其控制试验和增强温室效应试验的初步分析 [C] //陈隆勋等. 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第二集). 北京: 气象出版社, 61-84. Chen Keming, Zhang Xuehong, Jin Xiangze, et al. 1996. A coupled ocean-atmosphere general circulation model and primary analyses of control and enhanced greenhouse effect experiments [C] //Chen Longxun, et al. Study on Climate Change and Numerical Simulation (Vol. II) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 61-84.
- 陈克明, 张学洪, 金向泽, 等. 1997. 一个用于全球气候变化研究的海洋大气环流耦合模式 I. 模式的形成及性能 [J]. 海洋学报, 19 (3): 21-32. Chen Keming, Zhang Xuehong, Jin Xiangze, et al. 1997. A coupled ocean-atmosphere general circulation model for studies of global climate change. I. Formulation and performance of the model [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 19 (3): 21-32.
- 丹利. 2003. 大气和生物圈双向耦合模式中的多尺度变化模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 192pp. Dan Li. 2003. Simulation of multi-scale variation in the two-way interaction model between biosphere and atmosphere [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 192pp.
- Dan Li, Ji Jinjun, Li Yingpeng. 2002. Climate simulate based on a different grid nested and coupled model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (3): 487-499.

- Dan Li, Ji Jinjun, Zhang Peiqun. 2005. The soil moisture of china in a high resolution climate-vegetation model [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 22 (5): 720 - 729.
- Gates W L, Nelson A B. 1975. A new (revised) tabulation of the Scripps topography on global grid. Part II: Ocean depths [M]. The Rand Cooperation, Santa Monica Calif, CA, 132pp.
- Haney R L. 1971. Surface thermal boundary condition for ocean circulation models [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1: 241 - 248.
- 季劲钧, 余莉. 1999. 地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究 [J]. *大气科学*, 23 (4): 439 - 448. Ji Jinjun, Yu Li. 1999. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (4): 439 - 448.
- Ji Jinjun, Hu Yucong. 1989. A simple land surface process model for use in the climate study [J]. *Acta Meterologica Sinica*, 3: 344 - 353.
- Ji Jinjun. 1995. A climate vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface [J]. *Journal of Biogeography*, 22: 445 - 451.
- 李东辉, 张铭, 张瑰, 等. 2005. 热带印度洋偶极子发生和演变机制的数值研究 [J]. *海洋科学进展*, 23 (2): 135 - 143. Li Donghui, Zhang Ming, Zhang Gui, et al. 2005. The study of the occurrence and evolution mechanism of the tropical Indian Ocean Dipole [J]. *Advances in Marine Science (in Chinese)*, 23 (2): 135 - 143.
- 刘海龙. 2002. 高分辨率海洋环流模式和热带太平洋上层环流的模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 178pp. Liu Hailong. 2002. High resolution oceanic general circulation model and the simulation of the upper ocean circulation in the Tropical Pacific [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 178pp.
- 吕建华, 季劲钧. 2002. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 I: 物理通量和参数 [J]. *大气科学*, 26 (1): 111 - 126. Lü Jianhua, Ji Jinjun. 2002. A simulation study of atmosphere-vegetation over the Tibetan Plateau Part I: Physical fluxes and parameters [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (1): 111 - 126.
- Latif M, Sperber K, Arblaste J, et al. 2001. ENSIP: The El Nino simulation intercomparison project [J]. *Climate Dyn.*, 18: 255 - 276.
- Levitus S. 1982. *Climatological Atlas of the World Ocean* [M]. Washington, D. C.: NOAA Professional Paper 13, U. S. Government Printing Office, 173pp.
- Liu Hui, Jin Xiangzhe, Zhang Xuehong, et al. 1996. A coupling experiment of an atmosphere and an ocean model with a monthly anomaly exchange scheme [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 13 (2): 133 - 146.
- Liu Hui, Wu Guoxiong. 1997. A impact of land surface on July mean climate and onset of monsoon study with an AGCM plus SSIB [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 14 (3): 289 - 308.
- Liu Hui, Zhang Xuehong, Wu Guoxiong. 1998. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 15 (3): 410 - 423.
- 吕建华. 1999. 大气和植被的区域和年际尺度的相互作用的模拟分析 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 77pp. Lü Jianhua. 1999. The interaction simulation between atmosphere and vegetation under the regional and annual scales [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 77pp.
- Mechoso C R, Robertson A W, Barth N, et al. 1995. The seasonal cycle over the tropical pacific in coupled ocean-atmosphere general circulation models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123: 3825 - 3838.
- Meehl G A. 1990. Seasonal cycle forcing of EL Nino-Southern Oscillation in a global coupled ocean-atmosphere GCM [J]. *J. Climate*, 3: 72 - 98.
- Neelin J D, Latif M, Allaart M A F, et al. 1992. Tropical air-sea interaction in general circulation model [J]. *Climate Dyn.*, 7: 73 - 104.
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in the tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/ El Niño [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (5): 354 - 384.
- Reynolds R W, Smith T M. 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum Interpolation [J]. *J. Climate*, 7: 929 - 948.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P V, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401: 360 - 363.
- Venzke S, Latif M, Villwock A, et al. 2000. The coupled GCM ECHO-2. Part II: Indian Ocean response to ENSO [J]. *J. Climate*, 13: 1371 - 1383.
- Vintzileos A, Deleclus P, Sadourny R. 1999. On the mechanisms in a tropical ocean-global atmosphere coupled general circulation model. Part I: Mean state and the seasonal cycle [J]. *Climate Dyn.*, 15: 43 - 62.
- Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (G7): 14241 - 14259.
- 王在志, 宇如聪, 王鹏飞, 等. 2005a. 全球海-陆-气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 II: 垂直分辨率的提高及其影响. *热带气象学报*, 21 (3): 238 - 247. Wang Zaizhi, Yu Rucong, Wang Pengfei, et al. 2005a. The Development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation II: The Increase of vertical resolution and its influences [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*,

21 (3): 238-247.

- 王在志, 吴国雄, 刘平, 等. 2005b. 全球海-陆-气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 I: 水平分辨率的影响 [J]. 热带气象学报, 21 (3): 225-237. Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Liu Ping, et al. 2005b. The Development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation I: Influence of horizontal resolution [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (3): 225-237.
- Webster P J, Moore A M, Toschnigg J P, et al. 1999. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98 [J]. Nature, 401: 356-360.
- 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. 1997. LASG 全球海洋-大气-陆地系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究 [J]. 应用气象学报, 8 (增刊): 15-28. Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. 1997. Global ocean-atmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 8 (Suppl.): 15-28.
- Wu Guoxiong, Liu hui, Zhao Yuheng, et al. 1996. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance [J]. Adv. Atmos. Sci., 13 (1): 1-18.
- Yukimoto S, Endoh M, Kitamura Y, et al. 1996. Interannual and interdecadal variabilities in the Pacific in an MRT coupled GCM [J]. Climate Dyn., 12: 667-683.
- 吴统文, 吴国雄, 王在志, 等. 2004a. GOALS/LASG 模式对气候平均态的模拟 [J]. 气象学报, 62 (1): 20-30. Wu Tongwen, Wu Guoxiong, Wang Zaizi, et al. 2004a. Simulation of the climate mean state in the GOALS/LASG model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (1): 20-30.
- 吴统文, 吴国雄, 宇如聪. 2004b. GOALS 模式对热带太平洋 ENSO 年际变化特征的模拟评估 [J]. 气象学报, 62 (4): 154-166. Wu Tongwen, Wu Guoxiong, Yu Rucong. 2004b. The evaluation of the ENSO-like interannual variation in the GOALS/LASG model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (4): 154-166.
- 俞永强, Antoine Izard, 张学洪, et al. 2001. IAP/LASG 海洋环流模式对风应力的响应 [J]. 大气科学, 25 (6): 721-739. Yu Yongqiang, Antoine Izard, Zhang xuehong, et al. 2001. A response of IAP/LASG oceanic general circulation model to the observed wind stress [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (6): 721-739.
- 俞永强, 张学洪. 1998. 一个修正的海气通量距平耦合方案 [J]. 科学通报, 43 (8): 866-870. Yu Yongqiang, Zhang Xuehong. 1998. A modified monthly flux anomaly scheme for coupling an AGCM and an OGCM [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 43 (8): 866-870.
- 俞永强. 1997. 海-冰-气耦合方案的设计及年代际的数值模拟实验的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士论文, 135pp. Yu Yongqiang. 1997. Design of ocean-sea ice atmosphere coupling scheme and numerical simulation of interdecadal climate variability [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 135pp.
- Zeng Qingcun, Zhang Xuehong, Liang Xinzhong, et al. 1989. Documentation of IAP two-level AGCM [R]. TR044, DOE/ER/60314-H1, U. S. DOE., Feb. 383pp.
- Zhang Xuehong, Bao Nin, Yu Rucong, et al. 1992. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM [J]. Chinese J. Atmos. Sci., 16 (2): 129-144.
- Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangzhe, et al. 1996. Simulation of thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model [J]. Theoretical and Applied Climatology, 55 (1-4): 65-87.
- 周广庆. 1996. 热带太平洋和全球大气耦合环流模式的设计和气候的数值模拟 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士论文, 238pp. Zhou Guangqing. 1996. Design of a Tropic Pacific and global atmosphere general circulation coupled model and numerical simulation of climate variability [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 238pp.
- 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 2004. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟 [J]. 大气科学, 28 (3): 357-373. Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. 2004. Indian Ocean response to ENSO: observation and air-sea coupled model simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 357-373.
- 周天军, 张学洪, 俞永强. 2000. 气候系统模式中海-气水通量交换的耦合方法 [J]. 科学通报, 45 (19): 2097-2100. Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang. 2000. A coupled method of sea-atmosphere flux exchange scheme for an GCM [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45 (19): 2097-2100.