

一个具有高分辨率海洋分量的海气耦合模式*

张 韬 郭裕福 吴国雄

(中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学国家重点实验室,北京 100029)

提 要

发展了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)全球海-陆-气耦合系统模式的一个新版本(GOALS-5),其中海洋分量是基于30层高分辨率的海洋环流模式。对该耦合模式成功地进行了30年的积分,基本上克服了气候飘移。与GOALS较早的几个版本模拟的SST相比,北半球夏季中高纬地区的误差显著改善,可能主要是由于采用了GM90的等密度混合方案使经向热输送增强的结果。对赤道中东太平洋冷暖事件有较好的模拟能力,并且对SST变率的模拟在位置和强度上比旧版本有明显改善。

关键词:海-气耦合模式 高分辨率海洋分量 SST 等密度混合方案

引 言

海-气耦合模式已成为研究全球气候系统的重要工具之一,并已广泛地应用于气候和全球环境变化的研究和预测^[1,2]。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(LASG)气候模拟研究小组从1993年开始研制,发展了一个包括海洋、大气、海冰和陆面相互作用的全球耦合系统模式(Global Ocean Atmosphere Land System Model),简称GOALS^[3,4]。GOALS模式的第一版本GOALS-1.1于1996年底正式定型,随后不断发展完善,陆续推出第二版本GOALS-2、第三版本GOALS-3和第四版本GOALS-4。其中第四版本参加了国际耦合模式比较计划(CMIP)第二阶段的比较研究^[5]。研究表明^[6],GOALS模式的几个版本能够合理地模拟出观测到的气候平均态和气候变率的主要特征,但由于耦合模式的海洋分量分辨率较低,使模拟的海洋变量(如海表温度SST)的平均态或变率存在这样或那样的误差。例如,几个版本模拟的SST在北半球夏季中高纬地区明显偏低,南半球夏季中高纬地区也有较小的偏低,Nino3区模拟的SST距平振幅太弱,SST距平最大值位置太偏西等。因此,新一代具有较高分辨率海洋模式分量的全球海-陆-气耦合系统的建立是非常有意义的一项工作。

本文作者发展了一个全球海-陆-气耦合模式新的版本(称为GOALS-5)。其中的海洋模式分量与GOALS-1.1、GOALS-2、GOALS-3和GOALS-4所用的海洋模式相比,有了较大的改进。模式积分结果已用来研究冷暖事件对大气能量循环和纬向平均环流的影

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目:ZKCX2 中科创新 2-S W-210 以及国家自然科学基金委项目:40135020 和 4002300 联合资助。

2001-09-29 收到,2002-04-04 收到修改稿。

响^[7]。以下将分别对新耦合模式的海洋分量、大气分量和耦合方案加以介绍,并给出简要的评估结果。

1 模式介绍

自从1996年以来,Jin等^[8]在已有LASG海洋环流模式(OGCM)基础上,发展了IAP/LASG的第三代全球海洋环流模式。本文所发展的最新全球海-陆-气耦合模式(GOALS)的海洋分量就是基于这个第三代OGCM。同原有的海洋环流模式ML20^[9]相比,新的OGCM最主要的改进之处在于以下两个方面:

第一,垂直和水平分辨率有了显著提高,模式水平方向采用了纬向波数为63波的三角谱截断(T63)格点系统,格点大小约为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$,垂直方向为30层。选择T63水平分辨率的原因之一是由于Covey(1994)^[10]指出当模式格点间隔减小时,特别是从 4° 减小到 2° 时,大尺度的环流和热输送的变化非常明显。

第二,引入了一些相当成熟的参数化方案,包括太阳辐射的穿透作用^[11];采用依赖于理查逊(Richardson)数的涡旋混合系数;高纬水道(leads)区海-气热交换更详细的参数化方案;Gent和MacWilliams(1990,也叫GM90)^[12]的等密度和等密度厚度混合方案。

GOALS模式新版本的大气模式分量与GOALS-3和GOALS-4版本的大气模式分量相同,主要的物理过程包括:引入了新的K-分布辐射方案来取代旧的辐射方案^[13];简化的生物圈(SSiB)陆面过程模式^[14]并入大气模式中;诊断的云^[15]来取代给定的ISCCP的云^[16];并引入了太阳辐射日变化^[17]。具体请参见文献[6]。

这里所用的耦合方案不同于GOALS-1、GOALS-2和GOALS-3采用的“修正的月通量距平”耦合方案,而是采用逐日通量距平耦合方案。逐日通量距平耦合方案是Yu等(2000)^[18]在GOALS-3基础上引入了海气间的淡水通量交换而发展出的一种新耦合方案,并已在GOALS-4版本中采用。Yu等(2000)^[18]指出如果海洋模式(OGCM)和大气模式(AGCM)的耦合时间步长为1个月,那么大气的天气尺度扰动在耦合过程中就被忽略了。天气尺度活动在海-气相互作用中起着重要作用,尤其是在冬季的中高纬地区。因此一天或更短时间来作为耦合时间步长可以改善耦合模式的模拟性能。为了便于区分GOALS的前几个版本和本文所发展的新版本,我们称此新版本为GOALS-5。虽然GOALS-5采用逐日通量距平耦合方案,但耦合区域只限于开洋面($40^\circ\text{S} \sim 40^\circ\text{N}$),而且我们只考虑了热通量交换和动量交换。

2 模式效果检验

本文所发展的GOALS-5模式完成了30年的积分,模拟的逐月全球平均SST随时间的变化如图1所示。可以看到虽然模拟的SST年际和十年际振荡非常显著,但没有明显的漂移。图2给出了GOALS-5模拟的冬、夏季SST的地理分布特征,可以看到,GOALS-5能模拟出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。另外,模式也把西太平洋暖池夏季的北伸及中高纬地区的海温分布特征都模拟出来了。这与30层

海洋环流模式(T63)的结果一致^[8]。

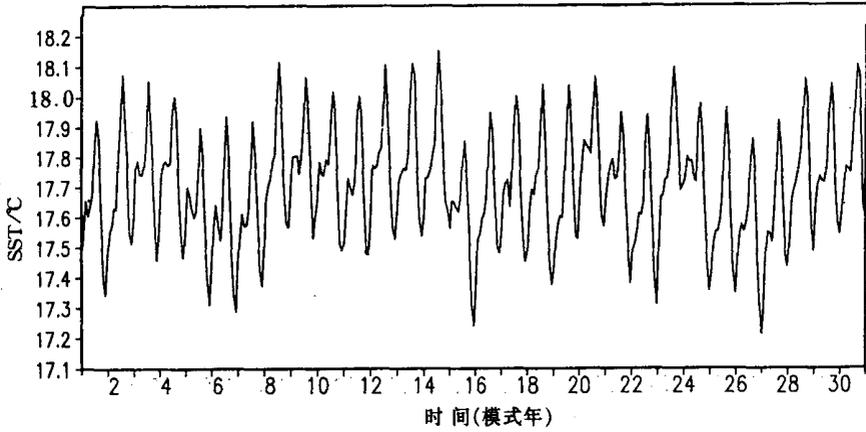


图1 GOALS-5 模拟的逐月全球平均海表温度(SST)随时间的变化

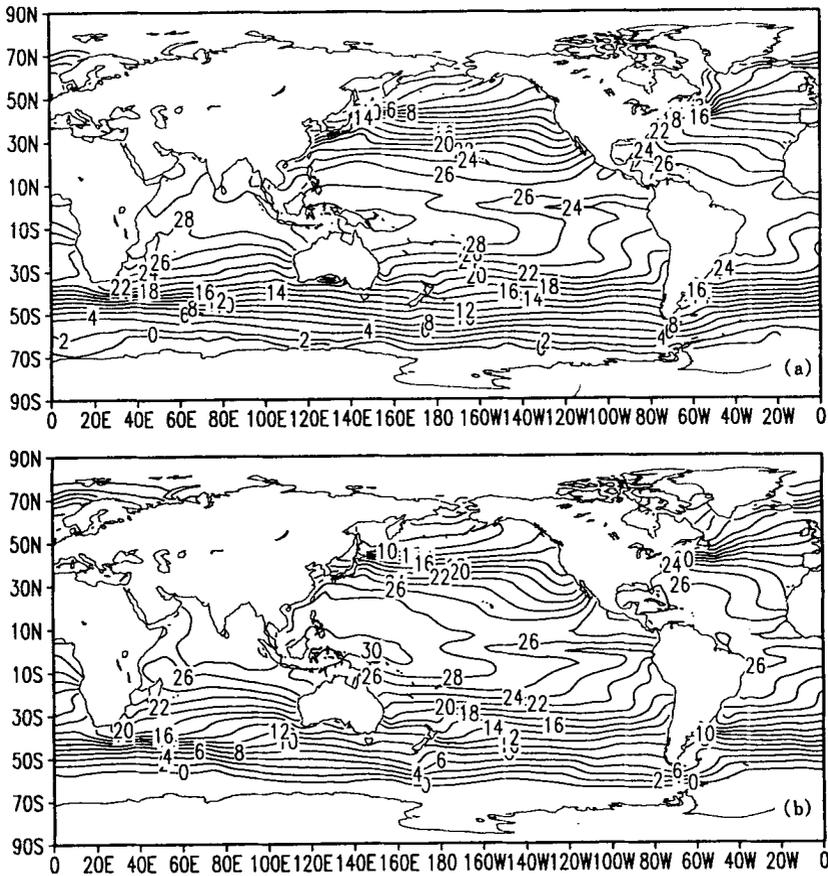


图2 GOALS-5 模拟的30年平均冬季(a)和夏季(b)的全球海表温度(SST)的分布(单位:℃)

Guo 等(2000)^[6]的研究表明,几个老版本的 SST 纬向平均分布都有同样的误差,即北半球夏季在中高纬地区明显偏低,南半球夏季在中高纬地区也有稍小的偏差。现在 GOALS-5 模式的海洋分量引入了一些较成熟的参数化方案,而且水平和垂直分辨率有了明显的提高,SST 的纬向平均分布是否应该有所改进呢?为此,我们仅给出 GOALS-1.1 (因为其它几个老版本的 SST 误差与 GOALS-1.1 相同^[6])、GOALS-5 和观测值^[19]的 SST 纬向平均图(图 3)来加以讨论。我们发现:与 GOALS-1.1 相比,GOALS-5 模拟的 SST 在北半球夏季中高纬地区有了显著的改善,与观测值已经非常接近(图 3b),而南半球夏季中高纬地区也有微弱的改善(图 3a)。这种改善可能主要是由于 GOALS-5 模式的海洋分量采用了 GM90^[12]的等密度混合方案,使得经向热输送比 20 层海洋模式(ML20)增强的缘故。Jin 等(1999)^[8]对单独的 30 层海洋模式(T63)进行的研究中也发现经向热输送有增强的趋势。

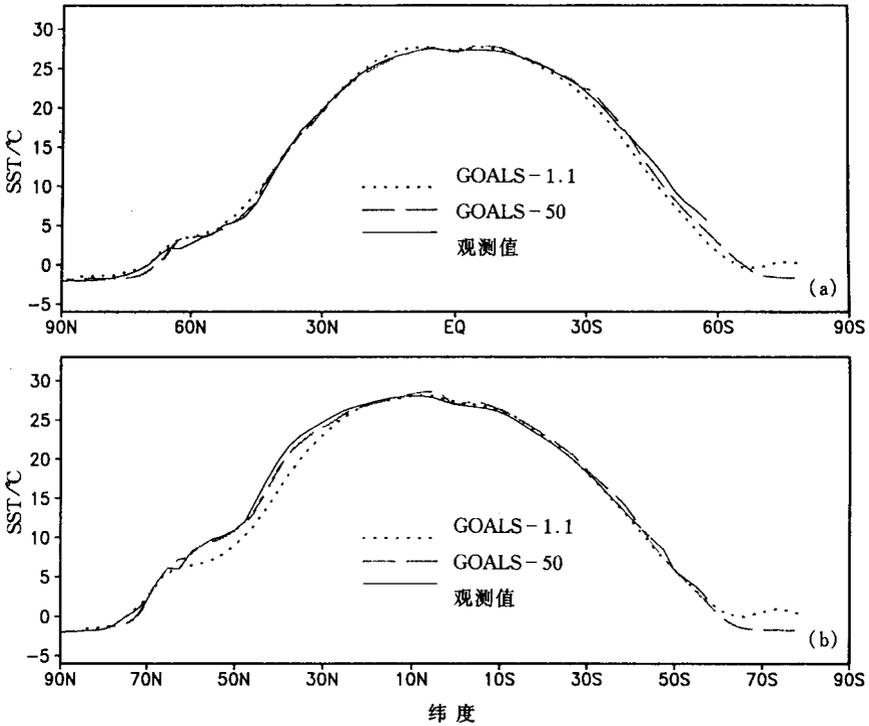


图 3 GOALS-5 和 GOALS-1.1 以及观测的冬季(a)和夏季(b)的海表温度(SST)的纬向平均图(单位:℃)

为了检验 GOALS-5 对海温 SST 变率的模拟情况,图 4 给出了其 30 年积分在太平洋 45°S ~ 45°N 范围的月平均海温距平经验正交函数(EOF)分析第一特征空间场及其时间系数。它解释了大约 24% 的方差。对海温距平的特征场(图 4a)分析可以发现,这个模态呈现出极其明显的厄尔尼诺变化的特征型,这与 Weare 等(1976)^[20]的观测结果是一致的。北美西部的太平洋沿岸及热带中东太平洋海温距平表现出同符号变化特征,而北太平洋中高纬度海域、西太平洋暖池区以及南太平洋 20° ~ 30°S 海域的海温变化与之相反,

海温变化幅度较大的区域主要位于近赤道中东太平洋。对应特征场的时间系数(图 4b)反映了该海温特征分布的时间演变特征。分析可以发现,时间系数的正负变化明显表现出年际振荡,30 个模式年中产生了大约 7~8 个冷暖事件。为了更清晰地描述新版本 GOALS-5 模式对 El Nino 时间尺度变率的模拟能力,图 5 给出了 GOALS-5 模拟的 30 年积分在赤道地区月平均 SST 距平分布特征。我们发现正负距平交替出现,周期大约是 2~7 年,这与观测到的 El Nino 时间尺度变率非常一致。和 GOALS 较早版本的海洋模式结果相比,GOALS-5 模式有两个方面的改进:一方面,旧版本模式中最显著的 SST 距平总是出现在 160°E~180°的地区^[6],但新版本 GOALS-5 中显著的 SST 距平可以出现在中东太平洋或东太平洋,这与观测事实非常接近;另一方面,SST 距平的西传和东传特征在 GOALS-5 中都可以找到,但旧版本模式仅能模拟出 SST 距平的西传特征,这主要是因为旧版本模式的分辨率较低,不能正确地描述东传的 Kelvin 波^[6]。同时我们注意到,GOALS-5 中最大的正 SST 距平大约为 1.5 °C,比旧版本有所改善,但比观测到的 El Nino 距平(最大可达 3 °C 以上)^[21]仍偏低。这种偏差也是许多耦合模式中共同存在的问题^[22-24]。尽管如此,新发展的 GOALS-5 模式对 SST 变率的模拟在位置和强度上比较早的 GOALS 版本都有明显的改善,对冷暖事件表现出较好的模拟能力。

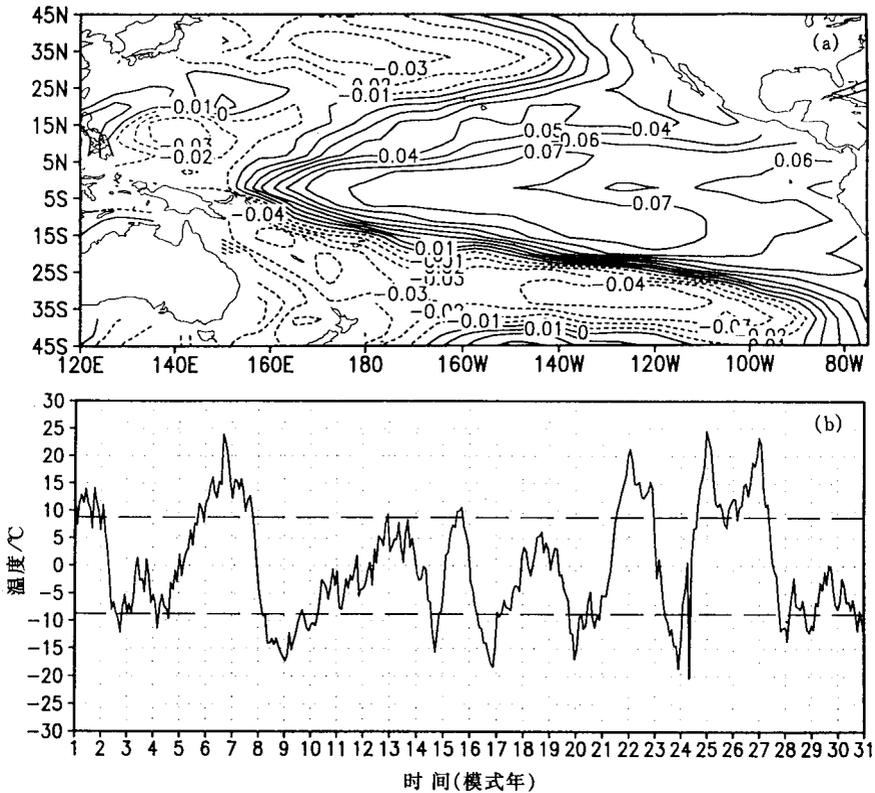


图 4 GOALS-5 模拟的南北纬 45°之间太平洋 SST 距平 EOF 分析的第一模态(a) 及其对应的时间系数(b) (b 图中虚线分别表示正负一个标准偏差)

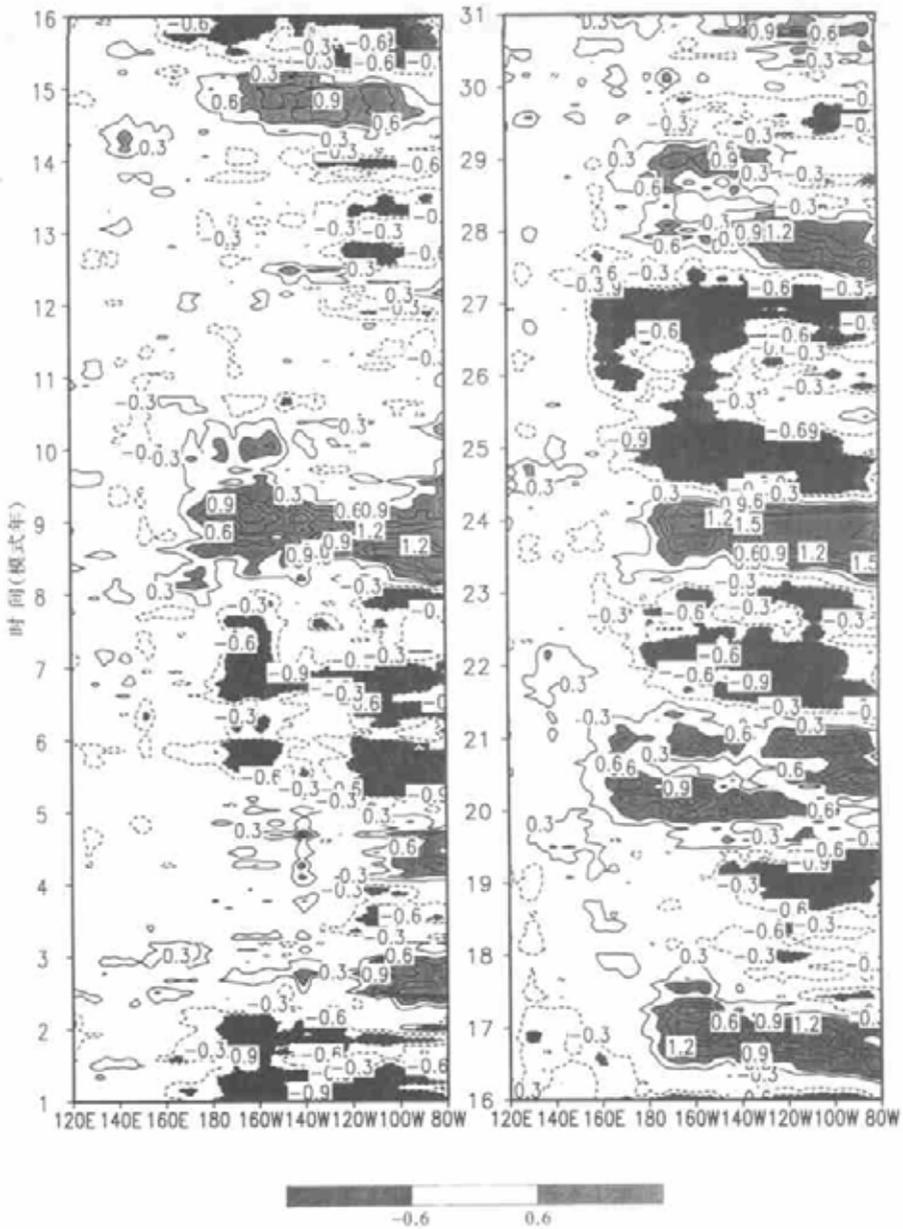


图 5 GOALS-5 模拟的赤道地区(4°S ~ 4°N)平均的 SST 距平的时间-经度剖面图(单位: °C)

参考文献

1 陈克明, 张学洪, 金向泽, 等. 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. 陈隆勋, 等编. 气候变化规律及其数值模拟研究论文. 北京: 气象出版社, 1996. 61 ~ 84.

- 2 周广庆. 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: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所. 1996 .
- 3 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 15 ~ 28 .
- 4 Zhang X H, Shi G, Liu H, et al. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 2000 . 252 .
- 5 IPCC. Climate change 2001: the scientific basis. In: Houghton J T, et al. eds. IPCC Third Assessment Report. Cambridge University Press, UK, 2001 . 944 .
- 6 Guo Y F, Yu Y Q, Zhang Tao. Evaluation of IAP/LASG GOALS model. In: Zhang X, et al. eds. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 2000 . 252 .
- 7 张韬. 气候系统中大气能量学的研究: [博士学位论文]. 中国科学院大气物理研究所. 2001 . 200 .
- 8 Jin X Z, Zhang X, Zhou T. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG World Ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**(2): 197 ~ 215 .
- 9 俞永强. 海-冰-气耦合方案的设计及年代际气候变化的数值模拟研究: [博士学位论文]. 中国科学院大气物理研究所. 1997 . 130 .
- 10 Covey C. Global ocean circulation and equator-pole heat transport as a function of ocean GCM resolution. Report No. 19, Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA), 1994 . 30 .
- 11 Rosati A, Miyakoda K. A general circulation model for upper ocean circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, **18**: 1601 ~ 1626 .
- 12 Gent P R, MacWilliams J C. Isopycnal mixing in ocean circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, 1990, **20**: 150 ~ 155 .
- 13 Wang B, Liu H, Shi G. Radiation and cloud schemes. In: Zhang X, et al. eds. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 2000 . 252 .
- 14 Xue Y K, Sellers P J, Klinger III J L, et al. A simplified biosphere model for use within general circulation models. *J. Climate*, 1991, **4**: 345 ~ 364 .
- 15 Liu H, Zhang X H, Wu G X. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM. *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15**(3): 410 ~ 423 .
- 16 Rossow W B, Schiffer R A. ISCCP cloud data products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, **72**: 2 ~ 20 .
- 17 邵慧, 钱永甫, 王谦谦. 太阳辐射日变化对 R15L9 气候模拟效果的影响. 高原气象, 1998, **17**: 158 ~ 169 .
- 18 Yu Y, Zhang X, Liu H, et al. Schemes for coupling the AGCM and OGCM. In: Zhang X, et al. eds. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 2000 . 252 .
- 19 Shea S. Climatology atlas: 1950 - 1979. NCAR NCDC NOAA NICHOLSON \ WMSC COADS, NCAR/TN- 269 + STR. 1995 .
- 20 Weare B C, Navato A R, Newell R E. Empirical orthogonal analysis of Pacific sea surface temperatures. *J. Phys. Oceanogr.*, 1976, **6**: 671 ~ 678 .
- 21 Reynolds R W. The 1982/1983 El Niño Sea Surface Temperatures. Climate Analysis Center, NMC, Washington D. C., USA. 1983 .
- 22 Meehl G A. Seasonal cycle forcing of El Niño-Southern Oscillation in a global coupled ocean-atmosphere GCM. *J. Climate*, 1990, **3**: 72 ~ 98 .
- 23 Yukimoto S, Endoh M, Kitamura Y, et al. Interannual and interdecadal variabilities in the Pacific in an MRI coupled GCM. *Climate Dyn.*, 1996, **12**: 667 ~ 683 .
- 24 Knutson T R, Manabe S, Gu D. Simulated ENSO in a global coupled ocean-atmosphere model: Multidecadal amplitude modulation and CO₂ sensitivity. *J. Climate*, 1997, **10**: 138 ~ 161 .

A COUPLED OCEAN ATMOSPHERE MODEL WITH A HIGHER RESOLUTION OCEANIC COMPONENT

Zhang Tao Guo Yufu Wu Guoxiong

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

Abstract

A new version of the IAP/LASG Global Ocean-Atmosphere-Land System (GOALS) model (called GOALS-5) with a higher resolution Oceanic General Circulation Model (OGCM) component is developed . GOALS-5 has been integrated successfully for 30 years without climate drift . The SST simulated by GOALS-5 in mid- and high-latitudes for the Northern Hemisphere summer is greatly improved in contrast with the results simulated by several old versions , which is maybe attributed to an enhanced meridional heat transport resulting mainly from the use of GM90 isopycnal mixing scheme . The new model version also has the ability to simulate the warm and cold events over the central and eastern equatorial Pacific . In comparison with the previous versions , the simulated amplitude and location of SST anomaly in the tropical Pacific is ameliorated in the new model .

Key words : Coupled ocean-atmosphere model High resolution oceanic component SST
Isopycnal mixing scheme