

大气环流模式 (SAMIL) 海气耦合前后性能的比较

王在志^{1,2} 宇如聪¹ 包庆¹ 周天军¹ 刘屹岷¹ 王鹏飞¹ 吴国雄¹

1 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 100029

2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 基于耦合器框架, 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大气环流谱模式 (SAMIL) 最近成功地实现了与海洋、海冰等气候分量模式的耦合, 形成了“非通量调整”的海-陆-气-冰直接耦合的气候模式系统 (FGOALS-s)。在耦合系统中, 由于海温、海冰等的分布由预报模式驱动, 大气与海洋、海冰之间引入了相互作用过程, 这样大气环流的模拟特征与耦合前会有不同。为分析耦合系统的性能, 作者对耦合前后的模拟结果进行了分析比较, 重点是大气模拟特征的差异。结果表明, 耦合前、后大气环流的基本特征相似, 都能成功地模拟出主要的环流系统分布及季节变化, 但是由于海温和海冰的模拟存在系统性的偏差, 使得耦合后的大气环流受到明显影响。例如耦合后热带海温偏冷, 南大洋、北太平洋和北大西洋等中纬度地区的海温偏高, 导致海温等值线向高纬海域的伸展较弱, 海温经向梯度减小。耦合后海冰在北极区域范围偏大, 在南极周边地区则偏小。海温、海冰分布模拟的偏差影响到中、高纬低层大气的温度。热带海温偏低, 使得赤道地区降水偏弱, 凝结潜热减少, 热带对流层中高层温度比耦合前要低, 大气温度的经向梯度减小。经向温度梯度的改变, 直接影响到对平均经圈环流及西风急流强度的模拟。尽管耦合系统中海温、海冰的模拟存在偏差, 但在亚洲季风区, 耦合后季风环流及降水等的分布都比耦合前单独大气模式的结果合理, 表明通过海-气相互作用可减少耦合前季风区的模拟误差, 改善季风模拟效果。比较发现, 海温、海冰模拟的偏差, 除与海洋模式中经向热输送偏弱、海冰模式中海冰处理等有关外, 也与大气模式中总云量模拟偏低有关。大气模式本身的误差, 特别是云、辐射过程带来的误差, 对耦合结果具有极为重要的影响。完全耦合后, 这些误差通过与海洋、海冰的反馈作用而放大。因此, 对于 FGOALS-s 而言, 要提高耦合系统的整体性能, 除改进各气候分量模式的模拟性能外, 需要重点改进大气模式中的云、辐射过程。

关键词 气候系统模式 大气环流 耦合性能

文章编号 1006-9895 (2007) 02-0202-12

中图分类号 P435

文献标识码 A

A Comparison of the Atmospheric Circulations Simulated by the FGOALS-s and SAMIL

WANG Zai-Zhi^{1,2}, YU Ru-Cong¹, BAO Qing¹, ZHOU Tian-Jun¹,
LIU Yi-Min¹, WANG Peng-Fei¹, and WU Guo-Xiong¹

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

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The spectral atmosphere model (SAMIL) developed at the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of

收稿日期 2005-08-02, 2006-01-23 收修定稿

资助项目 中国科学院团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”, 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418300, 国家自然科学基金资助项目 40475027、40221503、40575028、40523001

作者简介 王在志, 男, 1969 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事气候模式和气候数值模拟。E-mail: zaizwang@mail.iap.ac.cn

Sciences (LASG/ IAP/ CAS), has been coupled successfully with other climate components such as ocean and sea ice models recently through the coupler, upon which the Flexible non-flux-correction Global Ocean-Atmosphere-Land-Ice climate model system (FGOALS-s) has been built. Since the sea surface temperature (SST) and sea ice distribution are predicted by the models, and the interactions between the atmosphere with the ocean and sea ice are introduced in this coupled system, the simulated atmosphere circulation features may be different from those in the uncoupled system. To understand the performance of the coupled system, the simulated results, especially for the atmosphere circulation differences between the coupled and uncoupled systems, are compared in this paper. The results reveal that the mean atmospheric circulation features as well as the seasonal variations are very similar, which imply that the simulated SST and sea ice distributions are in agreement with the climatic ones. However there exist some biases in the SST and sea ice simulation, which influence the atmosphere circulations obviously. For example the tropical SST is colder after coupling, and SST in the middle latitudes in the Southern Ocean, the North Pacific Ocean and the North Atlantic Ocean are warmer, which cause the weaker SST extension to the high latitudes and weaker SST meridional gradient. The sea ice coverage around the north pole is wider while that around the South Pole is narrower after coupling. The biases of SST and sea ice influence the lower atmosphere temperature in the middle and high latitudes. Due to the colder SST in the tropics, the tropical precipitation along with the condensation heat in FGOALS-s is reduced significantly, which causes the colder atmosphere temperature in the middle and upper troposphere and reduces the meridional temperature gradient compared with SAMIL. The change of meridional temperature gradient influences the strength of the mean meridional circulation and the westerly jets directly. Though there exist the aforementioned biases in SST and sea ice simulation, the circulation and precipitation are more reasonable than those before coupling in the Asian monsoon area, which indicates that the air-sea interactions may reduce the simulation errors and play important roles in the mean monsoon circulation simulation. It is also found from the comparison that the biases of SST and sea ice are not only related to the weaker meridional heat flux transport in the ocean model and special processes in the sea ice model, but also related to the underestimated total cloud amount simulation in the atmosphere model. The biases induced by the atmosphere model, especially related to the cloud and radiation processes, have great influence on the coupling performance. These biases can be amplified through the interactions with the ocean and sea ice after coupling. From this point, more attentions should be paid to the cloud and radiation processes in the atmosphere model, while every component is to be updated to improve the whole capabilities of the coupling system in the future.

Key words climate system model, atmospheric circulation, coupling performance

1 引言

气候和环境变化是气候系统五大圈层(气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈、生物圈)相互作用的结果。要真正掌握气候系统的变化规律,必须立足于研究大气-海洋-陆地-海冰之间复杂的相互作用,可望胜任此项研究的工具就是耦合各圈层的气候系统模式。在现阶段,海-陆-气-冰耦合的数值气候系统模式正日益成为研究当前气候的特征和行为、了解其过去演变、预测其未来变异的不可替代的、最具潜力的工具。我国科学家从 20 世纪 80 年代开始发展大气环流模式和海洋环流模式^[1,2],90 年代初开始发展海气耦合模式^[3,4],90 年代末推出了全球海洋-大气-陆面耦合系统模式(GOALS)^[5,6]。这些模式系统参加了一系列的国际模式比较计划^[7-9]。

利用 GOALS 完成的增强温室效应对全球气候变化影响的模拟已被政府间气候变化委员会(IPCC)2001 年的科学评估报告所引用^[10]。

进入 21 世纪的这几年来,国际上气候系统模式有了很快的发展:在各子系统模式的发展方面,原来发展相对成熟的大气和海洋模式,其分辨率和物理过程得到进一步完善,并逐渐发展了大气化学模式;海冰模式和陆面模式发展迅速,可包含生物生长过程、碳循环过程等^[10]。在模式耦合技术方面,以前采用的“通量订正技术”逐渐被代之以“非通量订正”的直接耦合技术^[11]。从系统工程发展的角度,模式的模块化、标准化和并行化成为气候系统模式的主流技术发展方向;基于耦合器框架来集成不同专业、不同研究团体开发的各气候系统子模式,构建完整的气候系统模式乃至地球系统模

式,已成为当前国际上气候系统模式发展的趋势^[12]。

与国际上气候系统模式的发展同步,最近几年,我国、特别是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)气候系统模式的发展也很快^[6, 13],如对LASG的GOALS大气模式分量R15L9进行了不断的发展完善,不仅提高了其水平和垂直分辨率,模式的物理过程也得到了改进,同时还在模式标准化、模块化、并行化等方面做了大量工作,形成了新的大气环流谱模式(SAMIL)^[14, 15]。最近,以发展直接耦合模式方面的前期积累为基础^[13],在LASG相关课题组的共同努力下,利用NCARCCSM2的耦合器,实现了SAMIL与海洋、海面、海冰等模式的耦合,形成了海-陆-气-冰“非通量订正”的直接耦合的气候系统模式FGOALS-s^[16]。FGOALS-s是LASG格点大气模式对应的耦合气候系统模式FGOALS-g的姊妹版本。对SAMIL的模拟性能已有了初步的分析评估^[17, 18]。本文将单独大气模式SAMIL的运行结果和完全耦合后的结果进行比较,目的是分析耦合系统的模拟性能,重点是耦合系统中大气与海洋、海冰等相互作用过程的引入对大气环流模拟性能的影响。通过对耦合前后模拟差别原因的分析,为进一步改进耦合系统的模拟性能提供依据。

本文第2节给出大气模式SAMIL和耦合系统模式FGOALS-s的简要介绍,第3节对耦合前后的模拟结果作分析比较,最后给出本文的结论和讨论。

2 模式简介

SAMIL是在中国科学院大气物理研究所LASG发展改进的大气环流气候谱模式,其最早的版本系由澳大利亚墨尔本大学引入,分辨率为R15L9^[19]。经过多年的发展,在模式的动力过程、物理方案方面做了许多调整,如引入参考大气、与简化的简单生物圈陆面模式(SSiB)耦合等^[20]。近年来提高了其水平和垂直分辨率,并从模式的标准化的要求对模式作进一步的发展;特别是通过模块化过程,对不同的物理过程可

引入多个处理方案,这样可以在同一个模式框架下方便地实现不同方案的比较^[14, 15]。

对SAMIL的基本模拟特征已有了初步的分析^[14, 15, 17],模式对亚洲季风也有较好的模拟能力^[18]。本文中运行的模式版本与上述模式相比,运行是基于耦合器框架。除了运行方式不同外,陆面模式也不同。这里的陆面模式采用美国大气研究中心的通用陆面模式(NCAR CLM),原来的大气模式中耦合的陆面模式是SSiB^[21]。对于因不同陆面模式引起的差别,包庆等^[22]从感热通量、潜热通量、降水等方面做了分析,发现采用CLM后,模式的模拟性能有明显改善。另外在辐射过程中,为实现耦合系统总的能量收支平衡,对云参数过程中的云冰光学厚度参数做了适当的调整。本文中耦合前后的大气模式完全相同,例如采用的物理参数化方案、云冰光学厚度参数的选择等。模式中对流过程采用Tiedtke质量通量方案^[23];云是Slingo诊断云方案^[24],低云处理采用基于统计云的参数化方案;边界层处理是Holtslag的非局地边界层参数化方案^[25]。

FGOALS-s是中国科学院大气物理研究所LASG发展的“非通量调整”、直接耦合的气候系统模式(FGOALS)的谱大气模式版本,它包括了大气、海洋、海冰、陆面等分量模式,四个分量模式通过耦合器联系在一起。FGOALS的研制是LASG多个课题组共同合作的成果。首先是基于NCAR的气候系统模式CCSM2^[26],将其中的海洋模式替换为LASG发展的海洋模式^[27],形成FGOALS的一个实验版本^[13];随后,将该试验版本的大气模式分量,替换为LASG/IAP大气环流谱模式SAMIL,从而形成FGOALS-s。该气候系统模式耦合框架的核心是NCAR气候系统模式耦合器的第五版本(cp15)。通过“耦合器”这一灵活工具,气候系统各个分量模式之间可以实现“插拔方式”的运行^[12]。FGOALS-s中大气分量SAMIL的分辨率为R42L26;海洋分量为基于LASG/IAP第三代大洋环流模式L30T63^[28]、新近发展的高分辨率版本LICOM^[27],采用的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向分为30层。陆面和海冰模式,则依然保持为CCSM2中的陆面模式CLM和海冰模式

CSIM4。该版本被 LASG IAP 正式命名为 FGOALS-s1.0^[16]。

3 耦合前后积分结果的比较

海气耦合前后大气模式的运行都是基于耦合器。其差别是,耦合前的大气模式积分中,海洋和海冰采用观测海洋和观测海冰模式,即用气候平均的海温和海冰分布;耦合后的模式积分,海温和海冰采用模式预报结果。进行海-气耦合前,只包含“陆-气耦合过程”的模式积分了 50 年,得到“大气和海洋未耦合”的积分结果;进行海-气耦合后,包含完整的“海-陆-气-冰”耦合过程的模式积分了 200 年,得到“完全耦合”后的结果。耦合积分过程大气和海洋的初始场,分别是气候海温和气候大气强迫条件下的多年积分结果。该耦合气候系统模式目前已稳定运行 200 年以上,从结果看虽然深层海温仍处于调整过程中,但全球平均表层海温在经过大约 15 年积分后即基本达到了气候平衡态,不存在明显的线性漂移趋势,表明耦合模式在控制气候漂移趋势方面是成功的(图略)。本文分别取耦合前第 31~50 模式年和耦合后第 101~120 模式年各 20 年的月平均结果进行对比分析。为方便讨论,本文将耦合前的结果简称为“SAMIL”,将耦合后的结果简称为“FGOALS”。重点对冬、夏两季的季节平均分布特征作比较。

3.1 海气耦合前后模拟的海温和海冰

对大气模式而言,耦合前后的差别,主要在于海温、海冰等外强迫场的分布不同。从耦合前后海温季节平均分布(图略)看,两者的主要特征一致,热带暖水区的季节变化也与观测一致;但是在强度上,西太平洋暖池区的海温偏冷。图 1 是冬季和夏季 FGOALS 与 SAMIL 表面温度的差值。由于耦合前海温是气候观测值,因此两者的差值,实际上反映的是耦合系统所模拟的海温偏差、及由此对陆表气温的影响。从图 1 上给出的全球范围平均温度偏差值可看到,耦合后冬季温度平均偏冷 1 K 左右,夏季仅偏冷 0.34 K;而且海洋上大部分范围温度偏差值在 3 K 以下,因此耦合后海温模拟与实况基本接近。但也可看到一些明显的偏差,如在中高纬北半球温度总体偏冷,南半球则偏暖;在热带无论是冬季还是夏季,耦合后的海温都系统性偏低;热带太平洋温度偏低的幅度可达 3 K 以上。热带海

温的偏低与大气模式的云辐射过程有关,云量模拟的误差,使得到达热带海表的净热通量偏低(图略)。在北太平洋“黑潮”区海温冬、夏则一直偏暖,在西部接近大陆的最大中心偏暖 7 K 以上,这使得太平洋上的经向温度梯度减弱。在南半球中纬度,无论冬夏季节海温也是偏暖的。从以前单独大气模式的积分结果分析^[29],模拟的总云量偏低是该模式存在的问题。将耦合后的总云量与卫星观测资料比较(图略),全球平均总云量模拟值约为 44%,而观测为 66%,因此模拟值偏低约两成。从空间分布看,差别最大的区域正位于南、北半球中纬度洋面上,与图 1 中海温正偏差的分布区域一致。因此,模拟的中纬度海温偏高与大气模式模拟的云量少、到达海面的净太阳辐射偏多有关。

在高纬度海洋上温度差别也很明显。冬季北极附近温度偏低 10 K 以上,夏季南半球南极大陆的边缘温度也偏低 10 K 左右。这可能是由于在 SAMIL 中海冰分布为气候观测值,表层温度则根据热传导方程计算,而在 FGOALS 中,海冰分布是由海冰模式预报,海温则是海洋模式预报。两者海冰范围的不同及不同的海温计算方案导致温度相差较大。分析表明,耦合模式模拟的海冰范围明显偏大(图略);当用气候场强迫海洋模式时可看出海洋模式的极向热输送偏弱,而这可能仍是导致耦合模式中冬季海冰偏多的主要原因^[16]。夏季北极附近及冬季的高纬度洋面上温度的偏暖,与云辐射过程的影响有关。

图 1 也表明,耦合前后采用的陆面模式虽然相同,但陆面温度的差别也比较明显。特别是冬季欧洲大陆上耦合后温度偏冷 5 K 以上;在夏季偏冷的范围变小,但在欧洲西部仍偏冷 5 K 以上。注意到北大西洋高纬海域,模拟的海温冬夏都明显偏冷,这可能是导致其下游大陆上温度偏低的原因之一。由于南半球洋面上温度普遍偏高,使得南极大陆耦合后无论冬夏季节,温度都偏高 3 K 左右,南半球整体偏暖。因此,陆面温度的差异,明显地受周围海温的影响;此外,从后面的结果中可以看到,它也与降水和大气环流差异有关。

3.2 海气耦合前后模拟的降水

耦合前后海温、海冰分布的不同,直接影响到大气低层的温度结构,对降水的模拟也产生影响。图 2 是耦合前后冬、夏季纬向平均降水随纬度的分

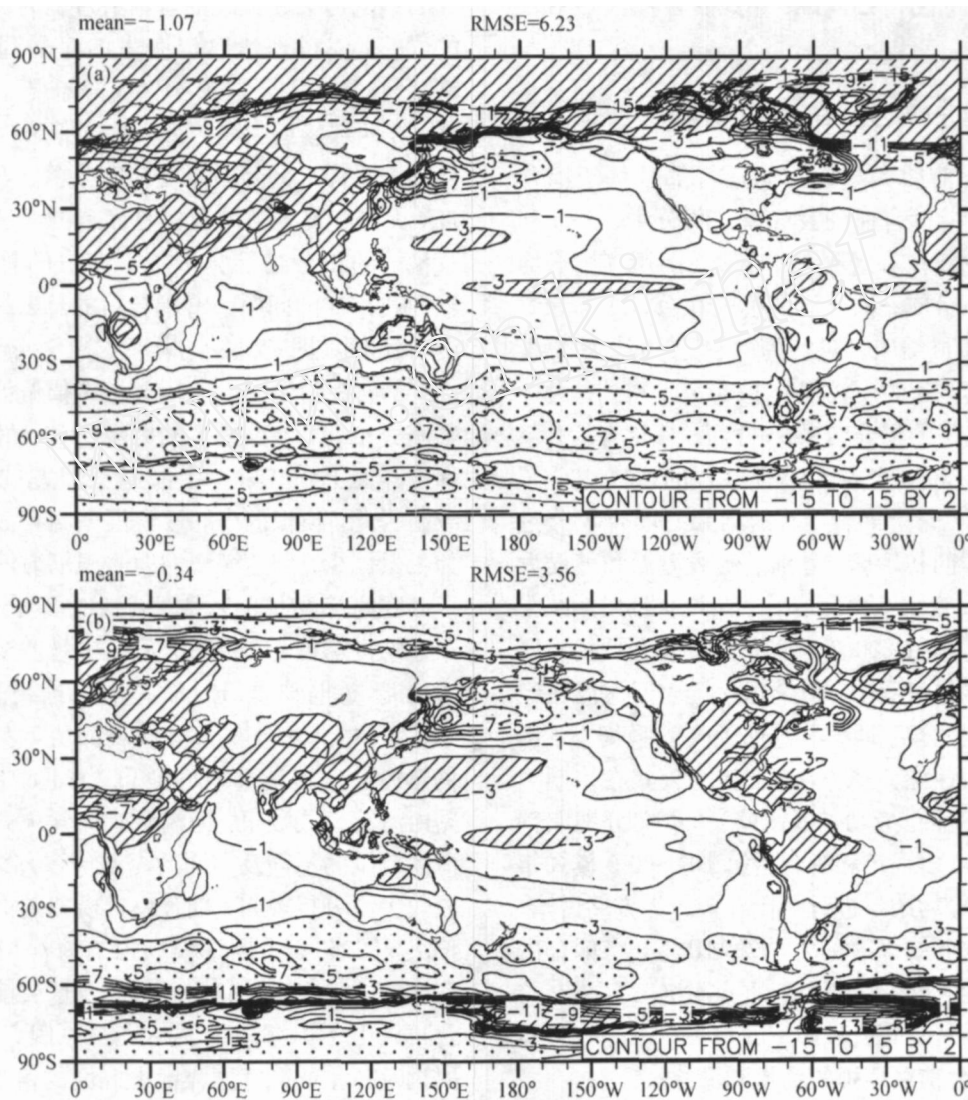


图1 FGOALS与SAMIL季节平均表面温度差(单位:K): (a)冬季; (b)夏季。等值线间隔:2K;斜线区差值小于-3K,点线区差值大于3K

Fig. 1 Seasonal mean surface temperature difference (K) of FGOALS minus SAMIL for winter (a) and summer (b). The contour interval is 2 K; the difference under -3 K is hatched, and that above 3 K is dotted

布,作为比较,还给出了观测的降水分布^[30]。从降水的纬向平均分布看,耦合前热带地区降水比观测强,特别是冬季南半球降水和夏季北半球降水偏强比较明显。耦合后,由于热带地区海温偏低,对流活动减弱、降水减少,使得降水最大值反而与观测接近。耦合前后中纬度地区的降水也有明显变化。中纬度降水属于锋面系统性降水,其强度与锋面强度,即温度梯度直接相关。从前文的海温分布、以及后文将给出的大气温分布看,耦合后南北温度梯度都减弱,这造成冬季北半球和夏季南半球降水都有所减少,与观测相比明显偏弱。在降水的空间

分布(图3)上,耦合模式能够成功地模拟出主要的降水分布特征,如赤道辐合带(ITCZ)、南太平洋辐合带(SPCZ)、欧亚大陆东部和北美大陆东部的中纬度降水带等,而且其季节变化特征亦与观测接近(图3a、c)。与耦合前单独大气模式模拟的降水比较,耦合后沿赤道的辐合性降水减少,特别是在太平洋中部,降水减少在10 mm/d以上,而澳大利亚北部的降水则增加,使得原来的SPCZ位置西移(图3b、d),降水强度则与实况更接近,这和前面降水的纬向平均结果是一致的。对赤道太平洋降水的模拟,目前气候系统模式共同存在的最大问题是

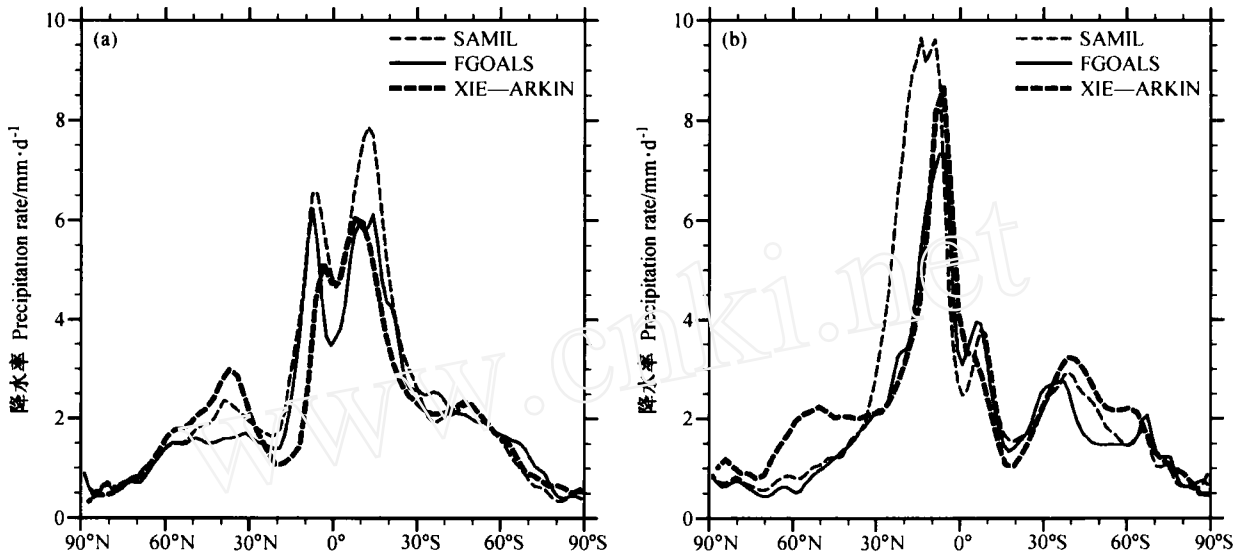


图 2 纬向平均降水随纬度的分布 (单位: mm/d): (a) 冬季降水; (b) 夏季降水
 Fig. 2 Latitudinal distribution of zonal mean precipitation (mm/d) for winter (a) and summer (b)

出现虚假的“双 ITCZ”^[31], 即有两个 ITCZ 分别居于赤道两侧。但从本文结果看, 无论是冬季还是夏季, 耦合前后都不存在“双 ITCZ”现象, 而且耦合后降水大值区西移, 其分布比耦合前更合理。在印度洋上, 冬季降水基本是增加的, 在夏季则主要是减少。另外, 赤道以北的非洲和美洲大陆地区, 夏季降水明显增加, 表明海气耦合过程对主要季风区降水都有明显影响。

在夏季亚洲季风区, 耦合前在中国东部沿海、孟加拉湾、印度半岛出现的强降水分布与观测一致, 但中心值比观测强; 在西太平洋上由于受过强的季风槽影响, 雨区偏北偏强, 而南印度洋至印度尼西亚附近的降水则偏弱 (图略)。这些特征与采用陆面模式 SsIB 时的情形类似^[14, 15]。耦合后西太平洋降水明显减少, 在印度半岛、孟加拉湾的降水中心强度有所减小 (图 3d), 但降水中心依然很清楚 (图 3c)。在亚洲大陆东部, 沿海降水增加, 由我国西南向东北延伸的季风降雨带分布更清楚。因此, 耦合后亚洲季风区的降水分布更合理。Fu 等^[32]对有、无海气耦合过程的结果进行了比较, 认为耦合前大气模式的误差导致模拟的降水不合理, 耦合后大气模式的误差通过海气相互作用的调整, 使气候分布达到新的平衡态。调整虽然使耦合后的海温分布与实况产生一定的差别, 但也使大气中原来的较大的偏差减少, 降水分布更合理。从后面的环

流分析看, 调整对季风环流的模拟也是有益的。

3.3 海气耦合前后模拟的环流场

图 4 给出耦合后纬向平均温度与耦合前差别的纬度-垂直分布剖面。可以看到, 低层的温度分布明显受下垫面的影响。如热带地区温度偏差较小, 偏冷幅度为 2 K 左右; 南半球中高纬度温度偏暖在 3 K 以上; 最大的偏冷位于冬季北极附近, 偏冷达到 15 K 左右, 到夏季偏冷则不明显, 甚至表现为弱的偏暖。这与前面给出的表面温度的分布特征一致 (图 1)。下垫面温度分布的影响, 在高纬度可以延伸到对流层中部, 使得南半球中高纬 500 hPa 以下的温度都整体偏暖, 冬季北极附近 500 hPa 以下的温度则偏冷 4 K 左右。但在热带及副热带对流层中部, 其温度分布则主要受降水减少、凝结潜热加热偏弱的影响 (图 2), 耦合后温度降低。温度负值中心所在纬度也与降水差值一致, 冬季位于南半球、而夏季位于北半球。夏季北半球温度偏低可达 6 K, 这也与夏季赤道以北降水偏差较大的特征一致 (图 2b)。另外, 根据吴国雄等^[33]和刘屹岷^[34]的研究, 对流凝结加热在对流层高层产生“过流”, 在那里产生冷中心。因此图 4 中由于降水减少, 对流层高层出现了暖中心。南北方向上海气耦合后热带地区的温度偏低, 使得大气温度的经向梯度减弱。

热带降水的差别对平均经圈环流的影响也很明

显。图 5 是耦合前后经圈流函数的纬向平均差值分布。无论是冬季还是夏季，差异大值区都位于热带地区，表明热带降水差异对平均环流有直接的影响。赤道附近降水的偏差在夏季比冬季大，使得夏季流函数的差值比冬季大。冬季降水差别主要位于赤道附近 (图 5a)，而赤道以南流函数增加、赤道以北流函数减少，这与降水减少、垂直上升运动减弱一致。夏季降水差别主要位于赤道以北 (图 5b)，因此流函数主要在赤道以北增加，减弱了耦合前的平均经向环流。与季节平均流函数的分布相比 (图略)，在副热带及中高纬地区，流函数差值场基本

与平均场反号，因此，耦合后的平均经圈环流总体减弱。这也与前面指出的海温经向梯度偏弱、大气温度经向梯度偏弱的特征一致。

在耦合前后 200 hPa 势函数的差值图 (图略) 上可以看到，其辐散、辐合中心与降水差值有着很好的对应关系。如在冬季，辐散中心主要位于赤道印度洋、并向东延伸至澳大利亚北部，降水相应增加；在赤道以南的中太平洋上为强的辐合差值区，降水相应减少。在夏季，大的辐散区主要位于热带印度洋西部，并向西延伸至大西洋西部；而强的辐合中心则位于西太平洋。在 200 hPa 平均纬向风图

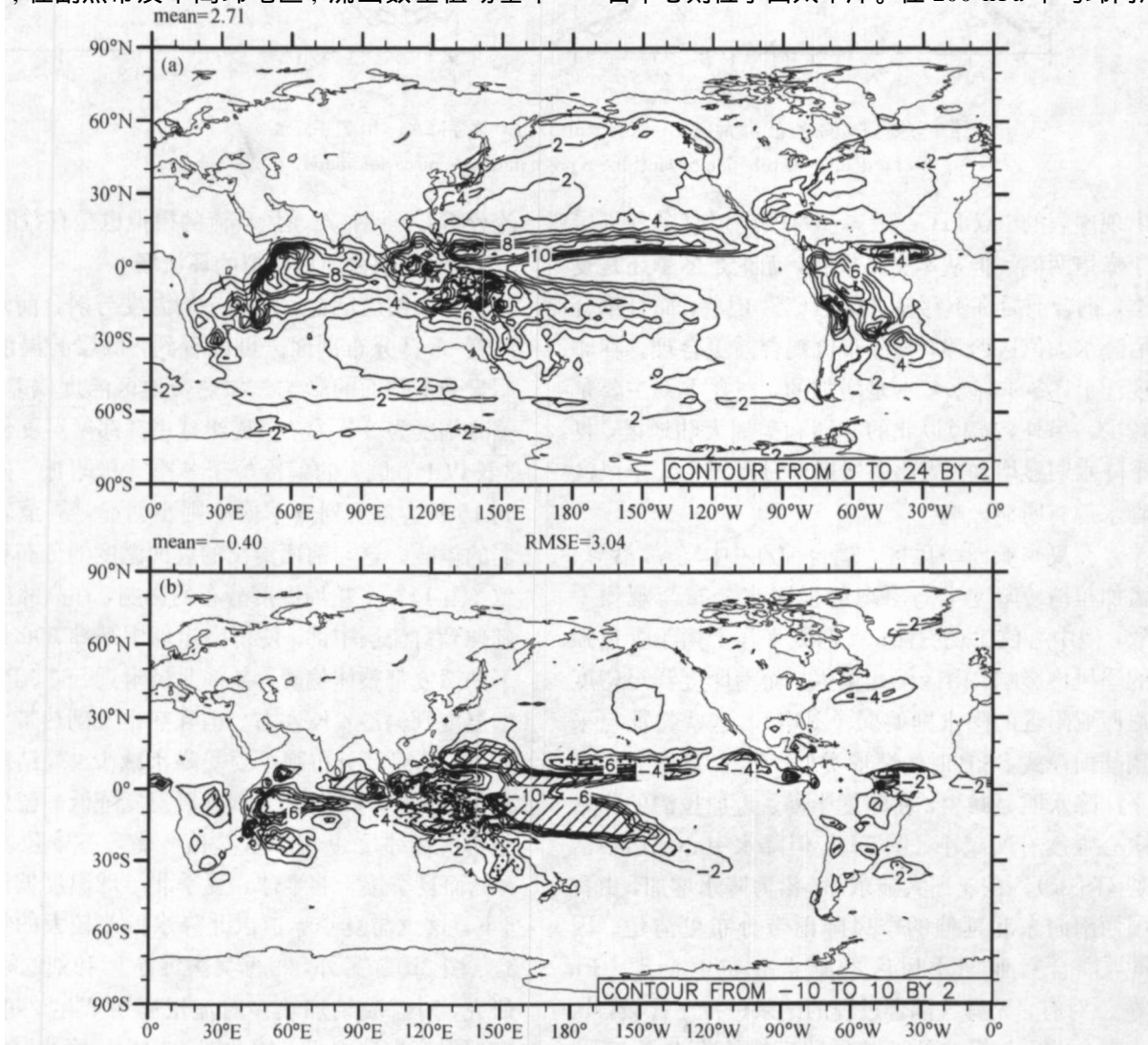


图 3 季节平均降水分布 (单位: mm/d): (a) FGOALS 冬季平均降水; (b) FGOALS 与 SAMIL 冬季降水差值; (c) FGOALS 夏季平均降水; (d) FGOALS 与 SAMIL 夏季降水差值。等值线间隔: 2 mm/d; 斜线区差值小于 -4 mm/d, 点线区差值大于 4 mm/d
 Fig. 3 Seasonal mean precipitation (mm/d) of FGOALS (a) and the difference of FGOALS minus SAMIL (b) for winter, and that of FGOALS (c) and the difference of FGOALS minus SAMIL (d) for summer. The contour interval is 2 mm/d, the difference under -4 mm/d is hatched, and that above 4 mm/d is dotted

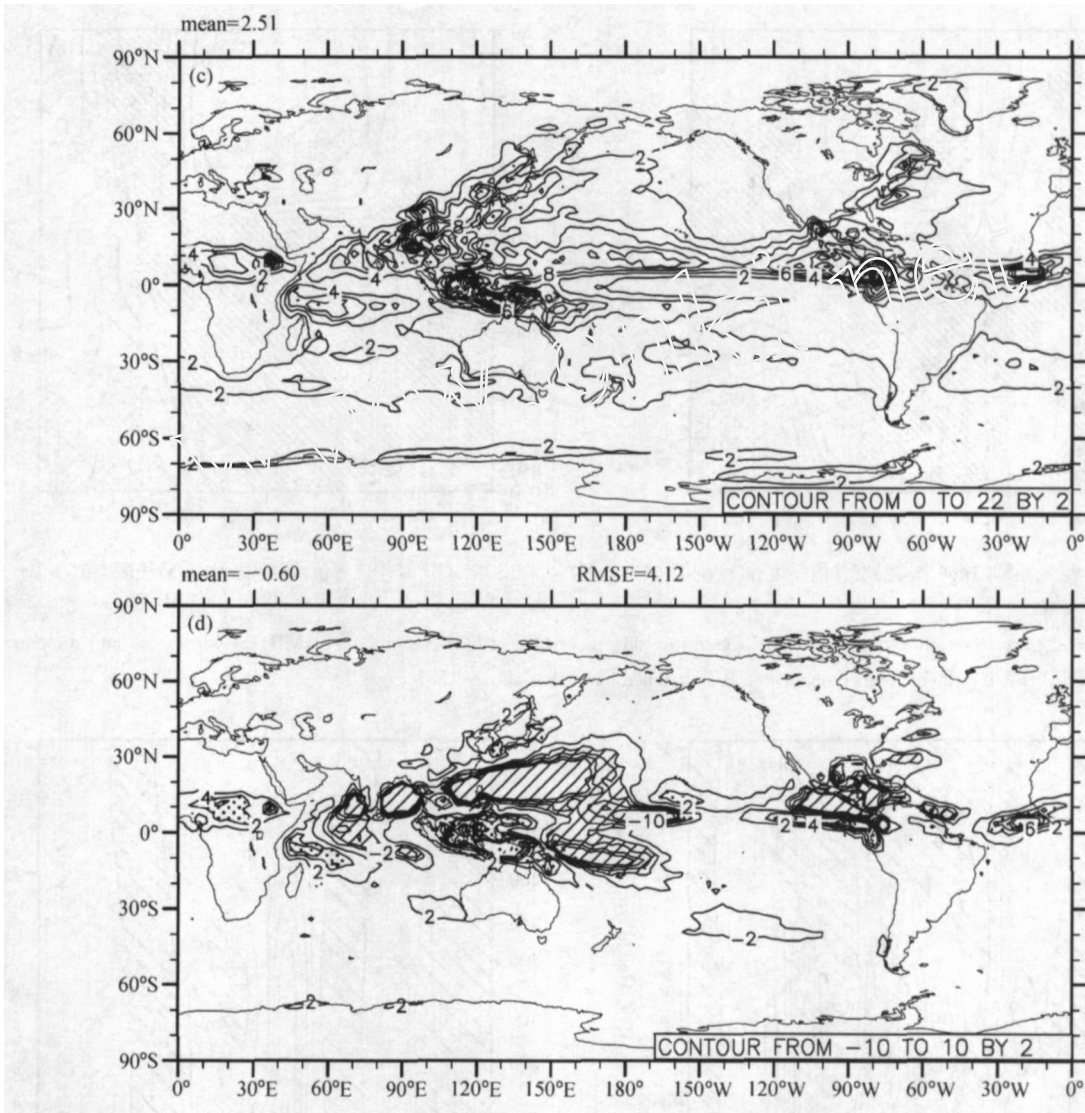


图 3 (续)

Fig. 3 (Continued)

(图略)上,耦合前后中纬度西风急流的位置和强度一致,且都能反映副热带急流冬季强、夏季弱的基本特征。但由于温度经向梯度的差别(图4),海-气耦合后,中纬度西风急流的强度比耦合前有所减弱(图6a、b),南半球急流强度减少超过15 m/s。在热带地区,冬季(图6a)印度洋上东风加强,太平洋上西风加强,表明印度洋及西太平洋纬向环流加强,与冬季印度洋到西太平洋赤道以南地区降水的增加一致(图3b);在夏季(图6b)印度洋及西太平洋上空西风加强、中东太平洋上空东风加强,表明两大洋上沿赤道的Walker环流强度都减弱、或对流位置西移,这与夏季降水的分布特征一致(图3d)。

在850 hPa平均纬向风分布图(图略)上,耦合前后冬、夏季850 hPa纬向风的主要特征都能得到较好的模拟。冬季南、北半球的热带东风和中纬度西风,以及亚洲大陆和北美大陆的西风急流等的模拟,耦合前后一致。在夏季,北半球西风带的北跳和减弱,南半球中纬度西风带的大值区等季节变化特征,耦合前后都能得到较好的模拟。但同时亦存在差别,从图6中给出的耦合前后850 hPa纬向风的差值分布看,冬季(图6c)在亚洲大陆以东,西风减弱,而沿60°N西风则加强,因此耦合后中纬度西风急流强度偏弱、位置偏北。南半球中纬度西风急流无论冬、夏,强度都减弱。在热带地区,耦合前后纬向风的差值与高层200 hPa的差值分布

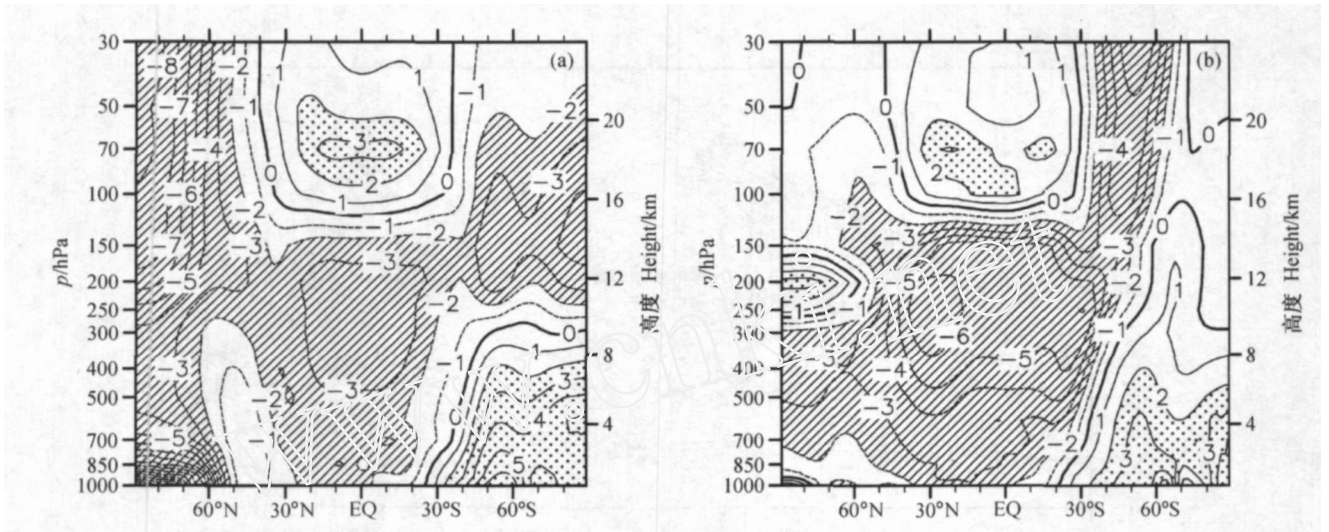


图4 FGOALS与SAMIL纬向平均温度差值纬度-高度剖面(单位:K): (a)冬季; (b)夏季。等值线间隔:1K;斜线区差值小于-2K,点线区差值大于2K

Fig. 4 Latitude-height cross section of zonal mean temperature difference (K) of FGOALS minus SAMIL for winter (a) and summer (b). The contour interval is 1 K, the difference under -2 K is hatched, and that above 2 K is dotted

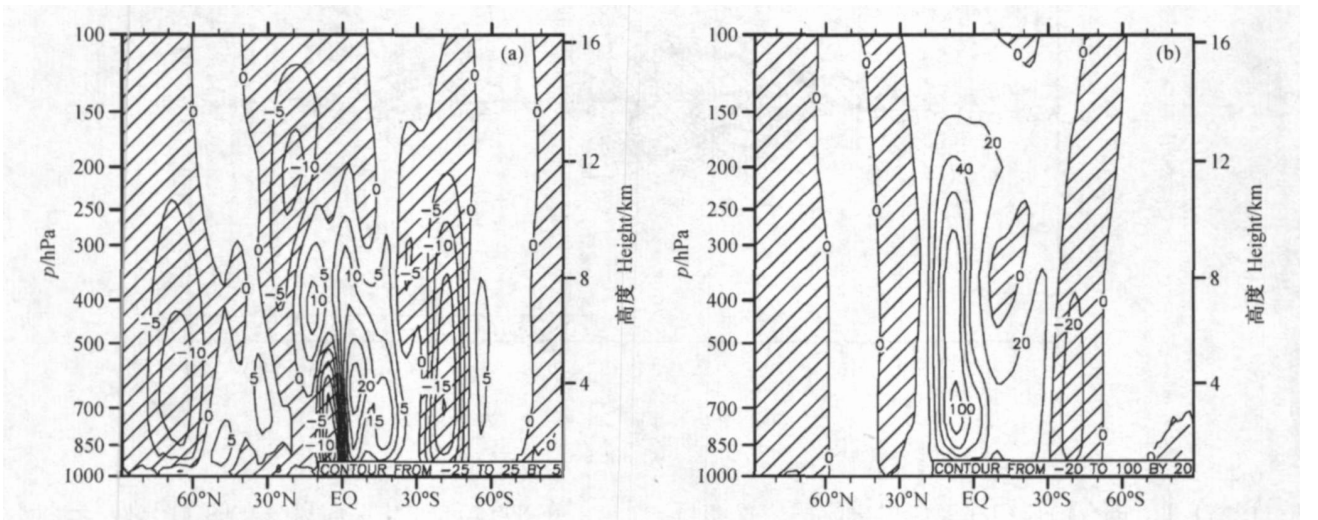


图5 FGOALS与SAMIL平均经圈流函数的差值分布(单位: 10^9 kg/s ,斜线区差值为负): (a)冬季,等值线间隔为 $5 \times 10^9 \text{ kg/s}$; (b)夏季,等值线间隔为 $20 \times 10^9 \text{ kg/s}$

Fig. 5 Latitude-height cross section of seasonal mean meridional stream function difference of FGOALS minus SAMIL for winter (a, the contour interval is $5 \times 10^9 \text{ kg/s}$) and summer (b, the contour interval is $20 \times 10^9 \text{ kg/s}$). The negative area is hatched

几乎相反,表明热带环流响应的斜压性特征。

从图6d可以看到,在亚洲季风区,从阿拉伯海向东至西太平洋为显著的东风异常;其与在我国大陆东部从西南向东北延伸的西风加强区,形成一个从南海到西太平洋的反气旋性环流。该反气旋环流反映了耦合后西太平洋降水减少(图3d),凝结潜热加热减少引起的大气Gill响应态。耦合后的西风强度减弱,从印度洋、孟加拉湾向东输送的水

汽减少,导致印度、孟加拉湾及西太平洋地区降水进一步减少,而我国大陆东部的西风加强,亦使得我国东部沿岸地区的水汽输送增加、降水增多。同时西太平洋上的西风减弱有利于海温增暖,这样通过海气相互作用的反馈过程,使气候系统达到新的平衡。在比较多个模式对亚洲夏季风的模拟能力时^[9],根据对降水的模拟情况将模式分为两类。从本文的降水结果来看,SAMIL应属于西太平洋降

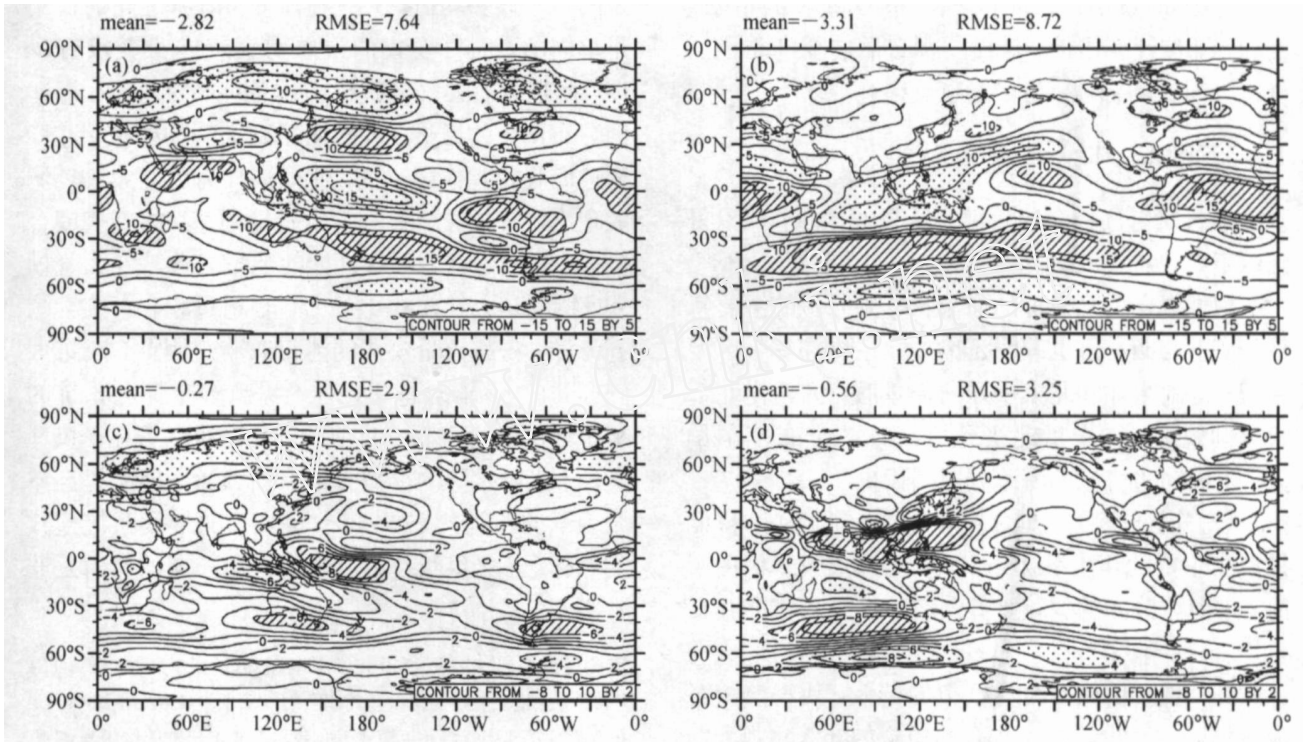


图 6 FGOALS 与 SAMIL 平均纬向风的差值：200 hPa 冬季 (a) 和夏季 (b)，等值线间隔为 5 m/s，斜线区差值小于 -10 m/s，点线区差值大于 5 m/s；850 hPa 冬季 (c) 和夏季 (d)，等值线间隔为 2 m/s，斜线区差值小于 -6 m/s，点线区差值大于 4 m/s

Fig. 6 Seasonal mean zonal wind difference of FGOALS minus SAMIL: at 200 hPa for winter (a) and summer (b), the contour interval is 5 m/s, the difference under -10 m/s is hatched, and that above 5 m/s is dotted; at 850 hPa for winter (c) and summer (d), the contour interval is 2 m/s, the difference under -6 m/s is hatched, and that above 4 m/s is dotted

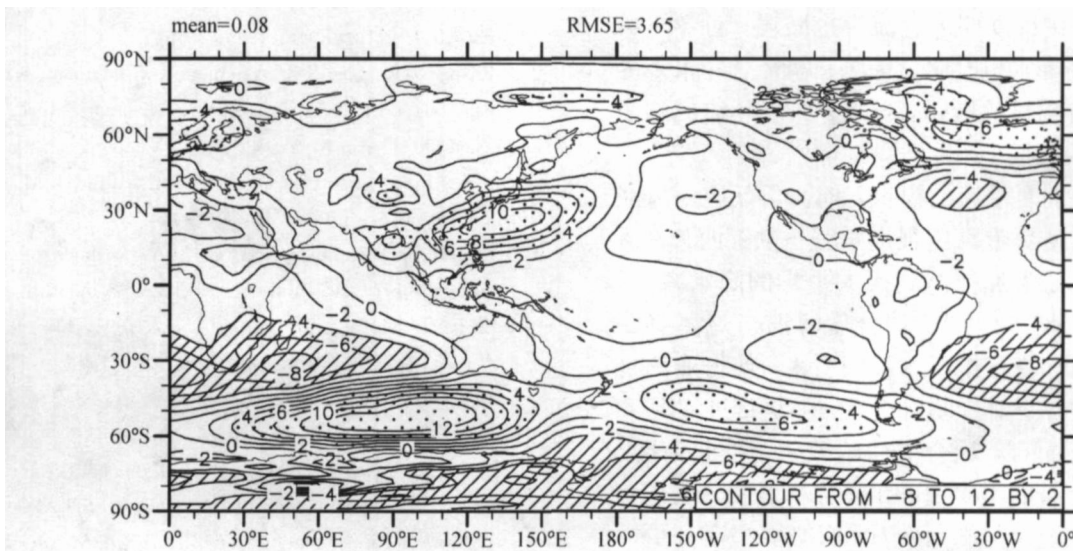


图 7 FGOALS 与 SAMIL 夏季平均海平面气压的差值 (单位: hPa)。等值线间隔为 2 hPa，斜线区差值小于 -4 hPa，点线区差值大于 4 hPa
Fig. 7 The summer mean sea level pressure difference (hPa) of FGOALS minus SAMIL. The contour interval is 2 hPa, the difference under -4 hPa is hatched, and that above 4 hPa is dotted

水偏多的一类，在环流场上表现为西太平洋副热带高压强度偏弱、位置偏东。图 7 给出了耦合后夏季

海平面气压场与耦合前的差值，可以看到在西太平洋地区差值场为正值，这也与 Gill 响应分布一致，

表明考虑海气耦合过程后,模式中的副热带高压强度加强、位置亦西伸,这使得耦合后的亚洲季风区降水分布更加合理,与实况也更接近。

4 结论与讨论

通过对海气耦合前后模式结果的比较,可以得到以下结论:

(1) 耦合系统模拟的海温、海冰分布的主要特征与观测接近,但也有明显偏差。主要是热带区海温偏冷,南半球和北太平洋海温偏暖,大西洋北部海温则偏冷;耦合后北极地区海冰的分布范围偏大,南极周边海域的海冰分布则偏少。

(2) 耦合前后大气的基本气候特征相似,都能模拟出主要的环流系统分布及其季节变化;但由于海温、海冰分布的偏差,耦合前后大气环流亦存在差别。

(3) 耦合后热带海温模拟的偏低,使得热带对流减弱降水减少。由于耦合前模拟的降水比观测偏多,这就使得耦合后热带降水的强度及分布反而更接近观测。热带降水偏少,使得凝结潜热加热减弱,导致耦合后对流层中高层偏冷,大气的经向温度梯度减小。

(4) 耦合后大气温度经向梯度的减小,使得平均经向环流、中纬度西风急流等也减弱,对冬半球中纬度锋面性降水也有明显影响;耦合后降水差异对热带环流有明显的影响,且高、低层环流的响应表现为斜压性特征。

(5) 对亚洲夏季风的模拟,耦合后低层西风减弱,西太平洋副热带高压强度加强、位置西伸,从印度半岛西部、孟加拉湾到西太平洋的降水减少,我国东部降水增加。虽然耦合后海温与观测有偏差,但由于海气相互作用过程的引入,使得亚洲夏季风降水的分布整体上更加合理,亦更接近实况。

对于大气而言,耦合前后的差别主要是海温、海冰下垫面分布的不同引起的,分析表明,从进一步提高耦合系统性能的角度看,有必要提高分量模式的性能。在极向热带输送的模拟方面,未来的改进工作重点应放在海洋模式上,而海冰的模拟对两极温度影响亦很大。南半球中纬度海温及北太平洋海温偏暖,则明显与大气模式总云量模拟偏少有关,因此,云-辐射过程是未来大气模式的改进重点。

分析中也可以看到,海气耦合前海温、海冰给

定的是气候平均值,大气与海洋、海冰之间的作用是单向的,大气模式的误差对大气本身就没有反馈;而耦合后大气模式模拟的偏差,对海温、海冰的分布产生的影响,进而反馈到大气的模拟,这样通过海气相互作用过程,使得耦合前后的大气环流表现出明显的差别。在“非通量调整”的直接耦合模式中,决定耦合系统性能的能量之来自大气模式,特别是大气模式中的云-辐射过程,直接影响到海洋、海冰分量模式的能量收支。因此,改进大气模式的云-辐射过程,对于提高整个耦合系统的模拟性能极为重要。目前的耦合系统尽管在季风环流、季风降水等的模拟方面有所改善,但从提高整个系统的性能、发展一个“完美”的气候系统模式的目标上看,继续持之以恒地付出长期的努力是非常必要的。

致谢 感谢刘海龙博士在 LICOM 海洋模式的研制、俞永强博士在 $1^\circ \times 1^\circ$ 海洋模式版本的调试及其耦合的重要前期工作、王斌研究员在 LASG 第四代气候系统模式不同版本发展工作中的组织和协调。本文计算工作,得到了中国科学院大气物理研究所计算信息科学中心的大力支持。

参考文献 (References)

- [1] Zeng Q C, Zhang X H, Liang X Z, et al. Documentation of IAP two-level atmospheric general circulation model. DOE/ER/60314-H1, TR044, 1989, 383pp
- [2] Zhang X H, Liang X Z. A numerical world ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, 6: 43~61
- [3] Zhang X H, Bao N, Yu R C, et al. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1992, 16: 129~144
- [4] Liu H, Jin X Z, Zhang X H, et al. A coupling experiment of an atmosphere and an ocean model with a monthly anomaly exchange scheme. *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, 13: 133~146
- [5] 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
Wu G X, Zhang X H, Liu H, et al. Global ocean-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 1997, 8 (Suppl.): 15~28
- [6] Zhang X H, Shi G Y, Liu H, et al. *IAP Global Ocean-Land System Model*. Beijing: Science Press, 2000. 259 pp
- [7] Gates W L, James S B, Curt C, et al. An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, 80: 29~55

- [8] Meehl G A, Boer G J, Covey C, et al. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 313 ~ 318
- [9] Kang I S, Jin K, Wang B, et al. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs. *Climate Dynamics*, 2002, **19**: 383 ~ 395
- [10] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment. Geneva: Cambridge University Press, 2001, 496 ~ 502
- [11] Boville B A, Gent P R. The NCAR climate system model, Version One. *J. Climate*, 1998, **11**: 1115 ~ 1130
- [12] 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题. *大气科学*, 2004, **28** (6): 993 ~ 1008
Zhou T J, Yu Y Q, Yu R C, et al. Coupled climate system model coupler review. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28** (6): 993 ~ 1008
- [13] Yu Y Q, Zhang X H, Guo Y F. Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in LASG/IAP. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 444 ~ 455
- [14] 王在志, 吴国雄, 刘平, 等. 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. *热带气象学报*, 2005, **21**: 225 ~ 237
Wang Z Z, Wu G X, Liu P, et al. The development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation. I: Influence of horizontal resolution. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 2005, **21**: 225 ~ 237
- [15] 王在志, 宇如聪, 王鹏飞, 等. 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*, 2005, **21**: 238 ~ 247
Wang Z Z, Yu R C, Wang P F, et al. The development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation. II: The increase of vertical resolution and its influences. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 2005, **21**: 238 ~ 247
- [16] 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s. 北京: 气象出版社, 2005. 288pp
Zhou T J, Yu R C, Wang Z Z, et al. *Atmosphere Circulation Model SAMIL and the Full Coupled Model FGOALS-s* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 288pp
- [17] Wu T W, Liu P, Wang Z Z, et al. The performance of atmospheric component model R42L9 of GOALS/LASG. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 726 ~ 742
- [18] Wang Z Z, Wu G X, Wu T W, et al. Simulation of Asian monsoon seasonal variations with climate model R42L9/LASG. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 879 ~ 889
- [19] Bourke W. A multi-level spectral model. I. Formulation and hemispheric integrations. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, **102**: 687 ~ 701
- [20] Wu G X, Liu H, Zhao Y C, et al. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**: 1 ~ 18
- [21] Liu H, Wu G X. Impacts of land surface on climate of July and onset of summer monsoon: A study with an AGCM plus SSiB. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**: 289 ~ 308
- [22] 包庆, 刘屹岷, 周天军, 等. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验. *大气科学*, 2006, **30**: 1077 ~ 1090
Bao Q, Liu Y M, Zhou T J, et al. The sensitivity of the spectral atmospheric general circulation model of LASG/IAP to the land process. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 1077 ~ 1090
- [23] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 1779 ~ 1800
- [24] Slingo J M. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1987, **113**: 899 ~ 927
- [25] Holtslag A A M, Boville B A. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. *J. Climate*, 1993, **6**: 1825 ~ 1842
- [26] Kiehl J T, Gent P R. The community climate system model, Version two. *J. Climate*, 2004, **17**: 3666 ~ 3682
- [27] Liu H L, Zhang X H, Li W, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluations. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 675 ~ 690
- [28] Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**: 197 ~ 215
- [29] Wu T W, Wang Z Z, Liu Y M, et al. An evaluation of the effects of cloud parameterization in the R42L9 GCM. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 153 ~ 162
- [30] Xie P, Arkin P A. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J. Climate*, 1996, **9**: 840 ~ 858
- [31] Mechoso C R, Robertson A W, Barth N, et al. The seasonal cycle over the tropical Pacific in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 2825 ~ 2838
- [32] Fu X H, Wang B, Li Tim. Impacts of air-sea coupling on the simulation of mean Asian summer monsoon in the ECHAM4 model. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 2889 ~ 2904
- [33] 吴国雄, 刘屹岷. 热力适应、过流、频散和副高 I: 热力适应和过流. *大气科学*, 2000, **24**: 433 ~ 446
Wu G X, Liu Y M. Thermal adaptation, overshooting, dispersion and subtropical anticyclone. I. Thermal adaptation and overshooting. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2000, **24** (4): 433 ~ 466
- [34] 刘屹岷. 非绝热加热与副热带高压. 北京: 高等教育出版社, 2003. 166 pp
Liu Y M. *Diabatic Heating and Subtropical Anticyclones* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2003. 166pp