

基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式^{*}

周天军 王在志 宇如聪 俞永强 刘屹岷
刘海龙 包庆 王鹏飞 李薇 吴国雄

(中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029)

吴统文

(国家气候中心, 北京, 100081)

摘 要

文章扼要介绍了基于 LASG/IAP 大气环流谱模式(SAMIL)的气候系统模式的新版本 FGOALS-s 的发展和结构。出于发展一个在东亚季风模拟方面有一定优势的气候系统模式之目的, FGOALS-s 的大气模式分量 SAMIL 采用了较高的水平分辨率 R42, 这相当于 2.8125° (经度) $\times 1.66^{\circ}$ (纬度), 高于三角截断 T42 的分辨率。对 FGOALS-s 在模拟大气、陆面、海洋和海冰的气候平均态, 以及主要的年际变率信号方面的能力进行了检验。分析表明, FGOALS-s 成功地控制了气候漂移趋势, 能够较为真实地模拟大气、海洋和陆面的气候平均态, 特别是受益于大气模式的较高分辨率, 由中国西南向东北延伸的夏季风雨带的分布, 在模式中得到较为真实的再现, 表明该模式在东亚夏季风的模拟上具有较强能力。耦合模式能够成功再现 El Niño 事件的非规则周期变化, 但是其年际变化的振幅较之观测要弱。赤道中西太平洋年际变率的强度较之赤道中东太平洋要强。在中高纬度, 模式模拟的北大西洋涛动模态, 在空间分布上与观测接近。FGOALS-s 模式存在的主要问题, 是模拟的热带海温偏冷、而中纬度海温则偏暖, 原因是模式模拟的云量分布存在偏差, 它直接影响到海表的净热通量收支。模式模拟的北大西洋高纬度地区的海温明显偏冷, 令该地区的年平均海冰分布的范围明显偏大; 然而受南极周边海温偏高影响, 南极洲周围的海冰范围则偏少。FGOALS-s 的未来工作重点, 宜放在大气模式的云过程、海洋模式的经向能量输送过程、以及海洋与大气的淡水通量耦合方案的改进方面。

关键词: 气候系统模式, 大气环流谱模式, 气候平均态, 年际变化。

1 引 言

气候和环境变化是气候系统 5 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, 能够胜任此项研究工作的工具是耦合各圈层的气候系统模式。在现阶段, 海-陆-气-冰耦合的气候系统模式正成为

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工具。世界气候研究计划(WCRP)为推动气候模式的发展, 在过去 15 年中相继组织实施了大气模式比较计划(AMIP)、海洋模式比较计划、陆面过程模式比较计划和耦合模式比较计划(CMIP)等。

中国地处亚洲季风区。亚洲季风系统是全球气候系统的重要组成部分, 涉及复杂的海陆气相互作

^{*} 初稿时间: 2005 年 8 月 29 日; 修改稿日期: 2005 年 9 月 7 日。

资助课题: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发与应用研究”、国家自然科学基金(40233031, 40475027, 40375029)。

作者简介: 周天军, 男, 1969 年生, 博士, 研究员。主要从事海气耦合模式的研制与应用、海气相互作用和气候变率研究。

E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn。

用过程。要理解与亚洲季风有关的海陆气相互作用机理,需要利用耦合气候模式系统来再现其复杂的非线性过程。东亚地区西倚世界屋脊,东临太平洋,地形多变,周边海陆分布复杂,特殊的地理条件造就了特别的气候特征和气候变化,这使得利用数值模式来模拟、研究和预测东亚、特别是中国的天气和气候,具有难以想象的困难,对模式的要求很高。因此,针对东亚区域的地形和气候特点,发展对东亚气候具有较好模拟能力的全球气候系统模式,是中国科学家责无旁贷的责任。中国学者从 20 世纪 80 年代开始发展大气环流模式和海洋环流模式,90 年代初开始发展海气耦合模式,90 年代末推出了全球海洋-大气-陆面系统耦合模式 GOALS。中国科学院大气物理研究所在上述环流模式研究上的成就,详见张学洪等^[1]的系统总结。

LASG/IAP 大气环流谱模式的发展,已经有 10 余年的历史。该模式以其对东亚气候的出色模拟能力,在国内气候学界得到较为广泛的应用;以其为大气分量建立的耦合气候系统模式 GOALS^[2,3],参加了国际耦合模式比较计划,其关于温室气体增加的气候影响的模拟结果,被 IPCC 第 3 次科学评估报告所引用,是该报告所引用的 22 个模式中唯一来自发展中国家的模式^[4]。但是,由于大气环流谱模式课题组长期以来致力于模式的发展和完善,无暇顾及命名问题,因此,该模式以往只是依据其分辨率不同而简单地被称作“R15L9”,“R42L9”和“R42L26”等。近年来,随着气候学研究范畴的拓展、计算机技术的飞跃,气候模式的发展,已经成为一个巨大的系统工程。为了加强组织协调、合理整合资源,确保数值模式的稳步发展,LASG/IAP 于 2005 年颁布了《关于 LASG 数值模式统一命名的暂行规定》,正式将 LASG/IAP 大气环流谱模式命名为“SAMIL”(Spectral Atmospheric Model of IAP LASG)^[5]。LASG/IAP 大气环流谱模式发展的历史沿革及其参考文献见表 1。

LASG/IAP 全球海洋-大气-陆面系统耦合模式 GOALS 在中国的气候变化、海陆气相互作用研究中,发挥了重要作用。但是,受当时计算机发展水平的限制,GOALS 模式的源代码是串行的,也没有采

表 1 LASG/IAP 大气环流谱模式的发展历史

Table 1 Development of LASG/IAP spectral AGCM

模式名称	模式分辨率	参考文献
R15L9-0	菱形 15 波、垂直 9 层	Wu 等 ^[6] ,1996 年
R15L9-1	菱形 15 波、垂直 9 层	Liu 等 ^[7] ,1997 年
R15L9-2	菱形 15 波、垂直 9 层	Liu 等 ^[8] ,1998 年
R15L9-3	菱形 15 波、垂直 9 层	邵等 ^[9] ,1998 年
R42L9	菱形 42 波、垂直 9 层	Wu 等 ^[10] ,2003 年
R42L26	菱形 42 波、垂直 26 层	王等 ^[11] ,2004 年
SAMIL	菱形 42 波、垂直 26 层或 9 层	王等 ^[12,13] ,2005 年

用模块化结构。近年来受高性能计算机迅速发展的影响,耦合气候系统模式正经历着前所未有的快速进步。模块化是当今国际上气候系统模式发展的主流技术方向,而采用“耦合器”结构的耦合框架,则是实现模块化的重要技术途径。目前在国际上较具影响力的一些先进的耦合气候系统模式,多采用耦合器框架结构^[14]。在此背景下,GOALS 模式非模块化、非并行的结构,已远不能适应耦合气候模式的发展需要。因此,近年来,LASG/IAP 开始着手引进国外先进气候系统模式、特别是美国国家大气研究中心(NCAR)的气候系统模式 CCSM 的耦合框架,开展模块化耦合气候模式的试验研究,并推出若干试验版本^[15]。

基于耦合器框架的气候系统模式试验版,为 LASG/IAP 在新一代气候系统模式的研发中采用耦合器技术、进行“非通量订正”的海洋与大气的直接耦合,积累了丰富的经验。以该试验版本为基础,近两年来,在实验室的统一组织和协调下,LASG/IAP 相关课题组密切合作、共同努力,重新设计模块化的、灵活的新版耦合气候系统模式 FGOALS (Flexible Global Ocean Atmosphere Land System model)。在保持统一的耦合架构下,FGOALS 的大气模式分量有 LASG/IAP 谱大气模式和格点大气模式两种选择^①;与谱大气模式 SAMIL 对应的版本,简称 FGOALS_s。目前 FGOALS_s 的第一版本 FGOALS_s 1.0 完成了一组 210 a 的控制积分、以及大气 CO₂ 浓度年递增 1% 直至达到加倍水平(约第 70 年)的增暖试验。本文的主要目的,是对基于 LASG/IAP 大气环流谱模式 SAMIL 的气候系统模式 FGOALS_s 进行介绍,系统评估其模拟能力。以此为基础,对其未来发展与完善工作进行讨论。

① 王斌. LASG/IAP 第四代气候系统模式 FGOALS 及其模拟实验. 中国科学院大气物理研究所 2005 年学术年会特邀报告. 2005.

2 模式介绍

2.1 耦合器

FGOALS-s 的结构见图 1, 它采用了模块化结构, 其核心是 NCAR CCSM2 的耦合器 CPL5^[16]。耦合器的功能主要有: 首先, 把耦合模式分割为若干独立的子模式模块, 以方便子模式的维护和改进, 客观上也极大地方便了耦合系统的并行运算; 其次, 同步协调和控制各子模式之间的数据流, 以控制整个耦合模式的运行和时间积分; 第三, 在保证通量守恒的前提下, 在各子模式之间进行界面通量的通讯, 并在需要的时候, 承担利用状态变量计算界面上某些通量的任务。FGOALS-s 包含 4 个地球物理动力模块, 即大气模式、海洋模式、陆面模式和海冰模式。4 个子系统模式保持独立, 彼此间通过耦合器进行数据交换。在耦合模式运行过程中, 4 个子模式同时积分, 以一定的时间间隔与耦合器交换信息。耦合器从子模式接收物理场, 计算、投影和合并有关数据, 随后再将其发送给各子模式。

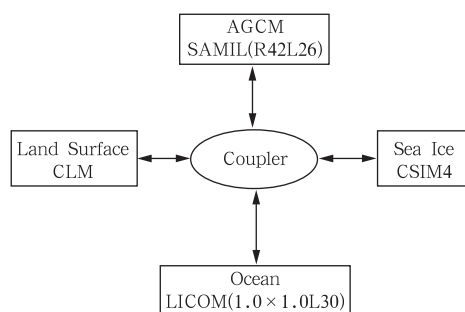


图 1 FGOALS-s 的结构示意

Fig. 1 Framework of FGOALS-s model

2.2 大气模式

FGOALS-s 的大气分量为 SAMIL。SAMIL 是在 LASG/IAP 发展改进的大气环流谱模式, 其最初版本由南京大学从澳大利亚墨尔本大学引入。经过 LASG/IAP 多年的发展, 在模式的动力过程、物理方案等方面做了许多调整, 如引入参考大气的处理等^[6]。近年来提高了其水平和垂直分辨率, 并按照标准化、模块化和并行化的要求, 对模式源代码进行了优化处理; 特别是通过采用模块化架构, 对同一物理过程引入了多种参数化方案, 使得可以在同一模式框架下, 根据研究目的之需要, 方便地实现不同参数化方案间的切换^[12,13]。出于发展一个在东亚季风模拟方面有一定优势的气候系统模式之目的, 这里所用的 SAMIL 版本具有较高的水平分辨率, 在水平

方向为菱形截断 42 波, 分辨率相当于 2.8125° (经度) $\times 1.66^\circ$ (纬度), 垂直采用 $\sigma-p$ 混合坐标系, 分为 26 层 (即 R42L26)。模式动力框架引入一参考大气, 采用半隐式时间积分方案, 辐射方案采用 Edwards 和 Slingo 提出的辐射参数化方案^[17]。引入 Sling 等提出的云量诊断参数化方案^[18], 同时加入一改进的层积云方案^[19]。此外, 还充分考虑了其他重要的次网格物理过程, 如 Tiedtke 等提出的湿对流调整方案以及垂直、水平扩散等^[20]。边界层过程采用非局地边界层参数化方案^[21,22], 此外还考虑了地形重力波拖曳^[23,24]。

2.3 海洋模式

FGOALS-s 的海洋分量为 LICOM (LASG/IAP Climate Ocean Model)。LICOM 是在 LASG/IAP 第 3 代大洋环流模式 L30T63 的基础上^[25], 参考国际上其他海洋模式的研制经验, 并从 IAP 现有计算资源的实际条件出发, 把模式水平分辨率加以提高而完成的高分辨率版本, 其改进还包括与水平分辨率相对应的水平混合方案^[26]。LICOM 保留了 L30T63 的基本特点, 包括: 非刚盖近似的完全原始方程模式和相应的守恒差分格式、水平方向球坐标和垂直方向 η 坐标的坐标系、中尺度涡参数化方案、热带上层海洋垂直混合方案^[25,26]。在保持模式源程序基本结构和主要变量名称定义不变的情况下, LICOM 发展者对模式源程序进行了模块化和计算并行化处理, 以促进该模式的可持续发展。LICOM 的水平分辨率有全球均匀的 0.5° 和 1.0° 两种选择, 这里采用的是 1.0° 分辨率的版本。垂直方向仍为 30 层, 其中 300 m 以上有 12 层。除了北极点被处理成一个孤岛外, 模式范围是全球的。

2.4 陆面模式和海冰模式

FGOALS-s 的陆面分量为 NCAR 研制的通用陆面过程模式 CLM^[27]。CLM 根据光合作用和植物水分的关系, 考虑了植物的水汽吸收, 并将能够反映植物吸收二氧化碳进行光合作用过程的生物化学模式引入其中, 可以较好模拟地表碳通量和二氧化碳浓度的日循环和季节循环。CLM 的植被冠层有 1 层, 土壤温度和土壤水分分布有 10 层, 厚度从 1.75 cm 到 3.34 cm 不等, 显式地处理液态水和冰; 依照积雪的厚度, 雪盖最多可分为 5 层。CLM 包含地面径流参数化方案。CLM 的水平分辨率和大气模式相同, 陆地下垫面每个网格包含 5 个次网格尺度的覆盖类型 (冰川、湖泊、湿地、城市和植被), 植被

分布包含 4~16 种植物类型,各有自己的叶面积指数和冠层高度,其资料来源是分辨率为 1 km 的卫星资料^[27]。

FGOALS-s 的海冰分量为 NCAR 研制的海冰模式 CSIM4^[28],其水平分辨率与海洋模式保持一致。CSIM4 考虑了海冰的热力学和动力学过程,把冰厚分为 5 层,最薄一层的冰厚为 64 cm。

2.5 耦合积分

FGOALS-s 的耦合积分过程分为两步:首先,海洋和海冰子模式系统采用“data-ocean”和“data-sea ice”模式,即取观测气候表层海温(SST)和气候海冰分布强迫,进行“陆-气”耦合的 50 a spin-up 积分。由于陆面模式采用“冷启动”方式,其初始场是随机给定的,因此,陆面模式达到平衡态需要约 5 模式年的时间。模式大气顶的能量收支平衡,经过约 50 a 的 spin-up 积分,基本达到平衡态^[5]。其次,在上述 50 a“陆-气”耦合积分的基础上,将“data-ocean”和“data-sea ice”模式,分别转换为 LICOM 和 CSIM4,开始进行完全的“海-陆-气-冰”耦合的模式积分。其中海洋模式的初值,取气候大气强迫下的 500 a spin-up 积分的结果,海冰模式的初始场取“冷启动”方式。

FGOALS-s 的完全耦合积分,进行了 210 a 模式年。在 IBM SP690 并行计算机上,采用 32 个 CPU,墙钟时间每 24 h 可完成约 2.4 模式年的积分。计算量较大是 FGOALS-s 的特点,这种计算耗费主要来自大气模式,因为其水平分辨率较高(R42

经向格点数远高于 T42 截断方式)。为节省磁盘空间,210 a 的耦合积分,前面 200 a 取逐月输出,后面 10 a 取逐日输出,以适应不同研究工作的需要。

3 模拟结果

3.1 长期趋势

SST 对海气界面上通量的变化极为敏感,全球平均 SST 的时间序列是衡量耦合模式长期气候漂移趋势的通用指标。FGOALS-s 200 a 控制积分的全球平均 SST 变化趋势见图 2。受海冰等过程的影响,例如海冰模式初值场采用了“冷启动”而没有 spin-up 过程,模式积分启动之初,全球平温 SST 有一弱变暖趋势,但经历了 15 a 左右的调整期后,耦合系统基本达到平衡,不存在明显的线性漂移趋势,表明耦合系统在控制气候漂移趋势方面是成功的。SST 直接影响模式大气,全球平均 SST 没有明显漂移趋势,是保证大气模式没有明显气候漂移的必要条件。不过,对于深海来说,在 200 a 的耦合积分过程中,海温有变冷的趋势,表现在全球体积平均海温上,其趋势为 $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$ (图略)。原因可部分地归因于耦合之前海洋模式的 spin-up 积分时间不够长,耦合积分启动时,深海依然处于向平衡态逼近、但尚未达到平衡态的状态。深层大洋的气候漂移,是多数耦合模式共同存在的问题,例如 NCAR CSM1,CCSM2 在经历长达 1000 年的耦合积分之后,全球体积平均海温依然存在线性漂移趋势^[29,30]。

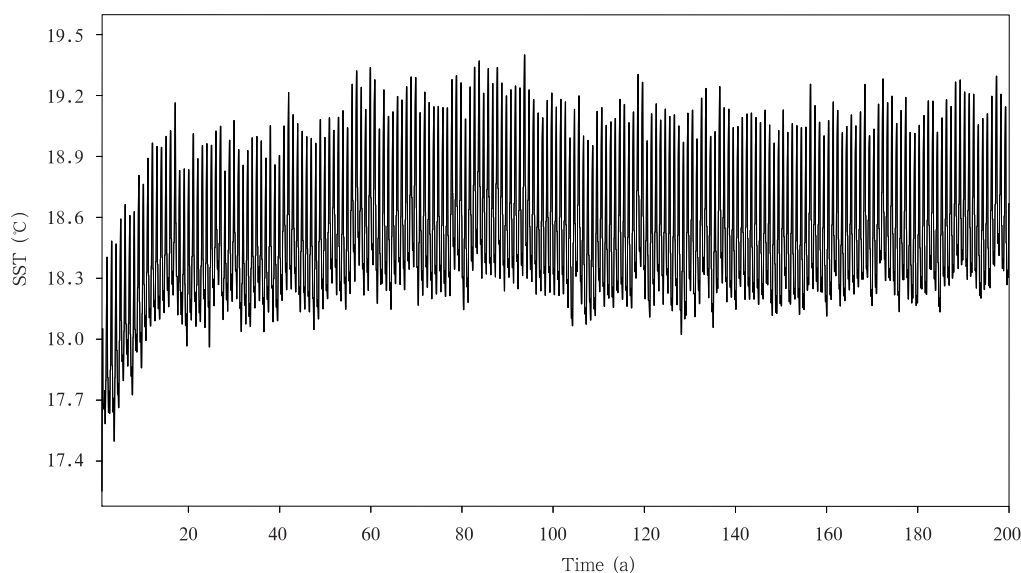


图 2 FGOALS-s 耦合积分过程中逐月的全球平均 SST 序列(单位:°C)

Fig. 2 Monthly global mean SST in the 200 years control simulation of FGOALS-s (unit: °C)

3.2 气候平均态

若无特殊说明,以下把模式的气候平均态,定义为 200 a 完全耦合积分过程中第 191~200 模式年的 10 a 平均值。

图 3 为模拟的 1 月和 7 月的平均海平面气压场。1 月份北半球的主要大气活动中心均与观测接近^[31],例如大陆上的西伯利亚高压、北美高压、北大西洋上的冰岛低压、北太平洋上的阿留申低压、以及北太平洋高压和北大西洋高压;南半球副热带洋面上的高压中心、环绕南极洲的低压带等,亦与观测分布接近。7 月份的全球大气活动中心,例如印度低压、北美低压、北太平洋高压、北大西洋高压、以及南半球沿陆地东岸的地面气压加强等,模拟与观测结果非常吻合。

图 4 为模拟的 1 月和 7 月的月平均降水的分布。就降水空间分布而言,观测资料中^[32],1 月份的主要雨带沿太平洋赤道辐合带(ITCZ)以及南太平洋辐合带(SPCZ)分布,此外,南美和南部非洲的副热带地区,亦有强降水区。FGOALS-s 能够成功地模拟出上述主要的降水分布特征。7 月份的雨带,主要沿西太平洋及季风区分布,沿着 ITCZ 在北非和拉美地区,亦有强降水分布,在主要雨带的分布

上,模拟和观测非常相似。关于亚洲季风区降水,印度季风降水的位置和强度与观测接近,孟加拉湾的强降水中心亦有合理反映;特别需要指出的是 FGOALS-s 对东亚季风区主要雨带的相对合理的模拟,例如由中国西南向东北延伸的季风降雨带的分布很清楚。因此,较之国外的一些通用模式而言^[33],FGOALS-s 对东亚季风区雨带的模拟能力有其优势,原因之一来自 FGOALS-s 大气分量 SAMIL 的较高分辨率。尽管 FGOALS-s 因其大气模式分辨率高而计算花费昂贵,但从着眼东亚季风降水模拟来说,这种花费是值得的。

降水模拟的不足之处,在于西太平洋暖池区的降水偏弱,与赤道东太平洋冷舌相对应的干区的带状分布,在 FGOALS-s 中向西伸展的范围过大。下文的证据将表明,这种不足来自耦合模式在 SST 模拟上的偏差。热带洋面降水量的模拟,与洋面温度的模拟密切相关,而 FGOALS-s 模拟的暖池区海温偏低,海温偏低不容易激发对流活动,从而导致降水减少。在热带,目前气候系统模式共同存在的问题是出现虚假的“双热带辐合带”现象^[34],即有两个 ITCZ 分别居于赤道两侧。FOALS-s 的结果,由于对赤道东太平洋沿岸的层积云参数化方案进行了处

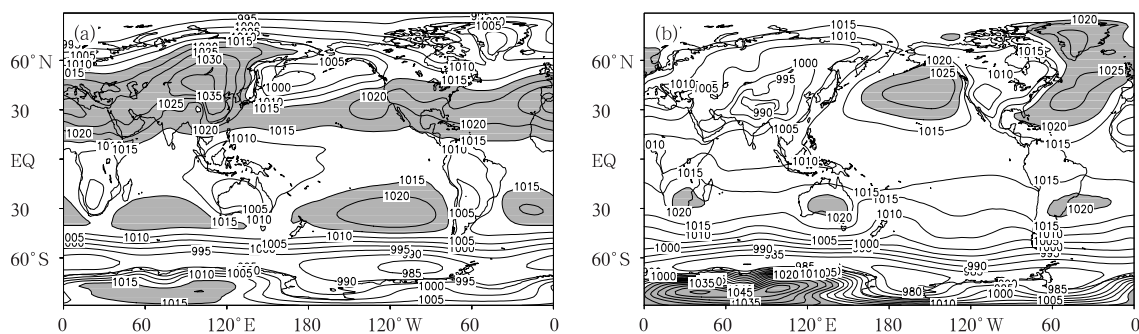


图 3 FGOALS-s 模拟的月平均海平面气压场 (a. 1 月, b. 7 月;单位:hPa)

Fig. 3 Monthly mean sea level pressure in FGOALS-s (a. January, b. July ;unit:hPa)

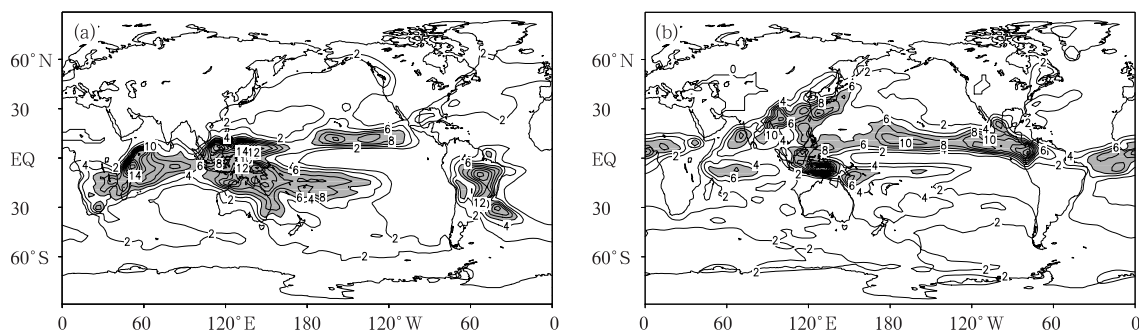


图 4 FGOALS-s 模拟的月平均降水场 (a. 1 月, b. 7 月;单位:mm/d)

Fig. 4 Monthly mean precipitation in FGOALS-s(a. January,b. July;unit: mm/d)

理^[19],使得耦合系统的虚假“双热带辐合带”现象不像一般的耦合模式那样明显,但这种处理在一定程度上抑制了“双热带辐合带”现象发生的同时,所带来的负面效应是模拟的冷舌向西伸展过强,无论夏季还是冬季,FGOALS-s 模拟的东太平洋冷舌西伸都很明显,这直接影响到对降水的模拟。

图 5 为模拟的 1 月和 7 月的表层土壤湿度的分布。1 月份土壤湿度较大的地区,主要位于北半球高纬度雪盖地区、北美大陆、以及热带地区。此外,从北非大陆、阿拉伯半岛到中国北方地区,土壤湿度

均不到 0.2;南半球南部非洲、澳洲、南美大陆的东岸,土壤湿度都大于 0.2,这和降水的大值区基本对应(图 4a)。7 月份土壤湿度大于 0.2 的区域,主要是西太平洋沿岸的季风区,以及北非和拉美对应于 ITCZ 的区域,土壤湿度较高的区域分布,和主要雨带的分布非常相似(图 4b)。此外,北非地区、阿拉伯半岛、中亚地区、西伯利亚、中国西北、北美大陆中部、以及南半球大陆,都属于干土带。格陵兰岛和南极洲常年的土壤湿度都高于 0.2,原因在于冰雪的覆盖。乌拉尔山临近地区的土壤湿度常年大于 0.4。

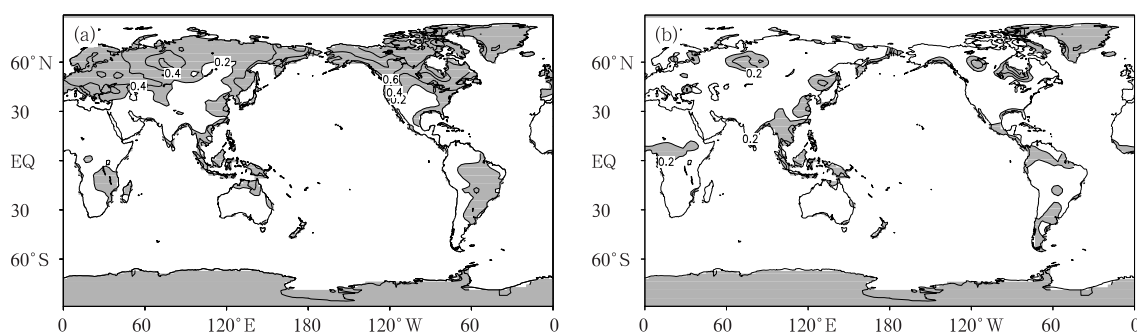


图 5 FGOALS-s 模拟的月平均表层土壤湿度 (a. 1 月, b. 7 月; 单位: mm^3/mm^3)

Fig. 5 Monthly mean soil moisture in FGOALS-s (a. January, b. July; unit: mm^3/mm^3)

图 6 为模拟的 3 月和 9 月的月平均表层海温分布。较之观测的气候 SST 分布(图略),耦合模式在能够相对合理地再现其总体分布特征的同时,一个突出的问题是热带海温的模拟偏低,例如西太平洋暖池区偏冷,最高海温只有 27°C ,无论冬季还是夏季,表征暖池区的 28°C 等温线在模式结果中已消失,下文将指出,这主要是由于云模拟上的偏差使到达海表的净热通量偏少造成的;同时,赤道东太平洋冷舌的西伸偏强。反映在年平均 SST 与观测的差值场上,热带和副热带大洋普遍偏冷,暖池区偏冷 2°C ,赤道中太平洋偏冷 4°C 左右(图略)。不过,南太

平洋辐合带(SPCZ)的东伸,并没有像多数海气耦合模式那样强^[30],因此,海气耦合模式常见的“双热带辐合带”现象,在该耦合模式结果中并不明显,这一点从降水场的分布上亦可看出,其原因上文已有讨论。

关于热带外海温的模拟,南大洋普遍偏暖,进一步分析发现,这种系统性的偏差,来自云量模拟上的误差(图略)。北半球热带外海温的模拟,在北太平洋和北大西洋西岸,模拟海温都明显偏高,导致气候海温分布等值线向高纬海域的伸展较弱、代之以平直的等温线分布。北大西洋高纬海域的模拟海温明显偏冷,高纬度的模拟偏差,是该模式比较突出的一个

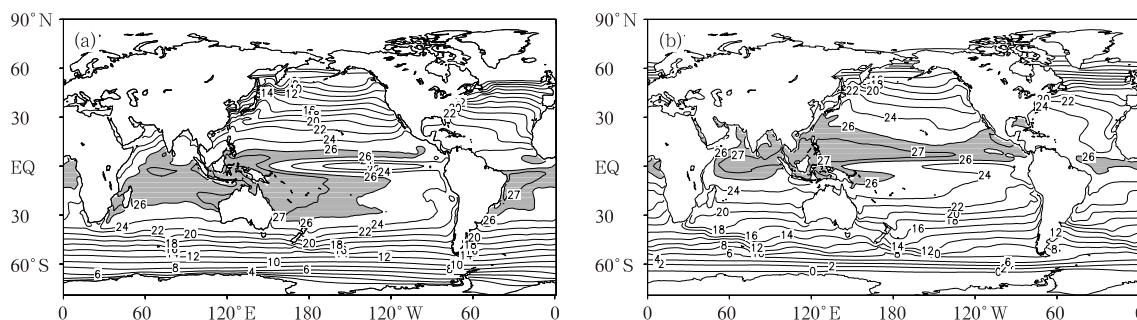


图 6 FGOALS-s 模拟的月平均 SST 分布 (a. 3 月, b. 9 月; 单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 6 Monthly mean SST in FGOALS-s (a. March, b. September; unit: $^\circ\text{C}$)

问题。在南、北美大陆的西岸、以及非洲大陆西岸的层云分布区,和多数耦合模式的结果一样^[30],模拟海温略偏高。据信这种误差,和模式模拟的沿岸区域的层积云分布有密切联系。不过和 NCAR CCSM2 相比(图 5b 的文献^[30]),这里模拟的大洋东岸的海温误差明显减少,这种改善,来自大气模式对层云的处理^[19]。

图 7 为模拟的全球大洋纬向平均经圈流函数的垂直分布。全球大洋经向物质输送的主要特点,一是在 1000~2000 m 深度上存在强劲的自北而南的经向流,中心强度为 45.0 Sv^①,它主要反映的是北大西洋深层水 NADW 的输送;二是 3000 m 以下深度上存在自南而北的南极底层水 AABW 的输送,中心强度接近 70 Sv;此外,南大洋还存在很强的 Deacon 环流。模式模拟的 1000~2000 m 深度上经圈输送的强度,较之 GOALS2 的 12.0 Sv^[35],DOC PCM 的 41.0 Sv^[36],NCAR CSM 的 29.2 Sv^[37],NCAR CCSM2 的 19.2 Sv^[30],GFDL 模式的 15.0 Sv^[38],BCM 的 20.0 Sv^[39],都明显偏强。尽管目前尚没有严格意义上的观测结果,但据估计经圈输送最大值介于 17~18 Sv 之间^[40],因此,模拟结果明显偏强。其原因待分析,鉴于大洋热盐环流对淡水通量变化的高度敏感性^[41],海洋与大气淡水交换的耦合方案可能是影响因素之一。

图 8 为模拟的年平均正压流函数分布。主要环流系统均得到较好的模拟,例如,北大西洋和北太平洋副热带大涡的强度分别为 25 Sv 和 60 Sv,前者非常接近北大西洋的观测值。南极绕极环流 ACC (Antarctic Circumpolar Current) 的强度最大达到 120 Sv;在德雷克海峡,强度为 100 Sv,非常接近目前多数耦合模式的平均情况 91.9 Sv^[42]。不过,和目前所掌握的观测值 130~140 Sv 相比^[43],模式结果依然偏弱。原因可部分归因于海洋模式的水平分辨率不够高,LASG 第 3 代大洋环流模式的第一版水平分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$,其 ACC 强度的年均值只有 70 Sv^[25],较之本文要弱将近一半。

图 9 为模拟的年平均北冰洋和南极地区的海冰密集度分布。较之观测(见图 8a 的文献^[30]),模拟结果的主要问题是北大西洋高纬海域的海冰范围过大,实际观测的海冰分布主要集中在拉布拉多海,而模拟结果中整个北大西洋高纬海域均被海冰所覆

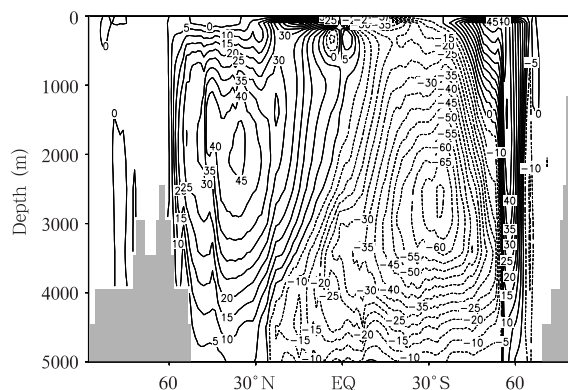
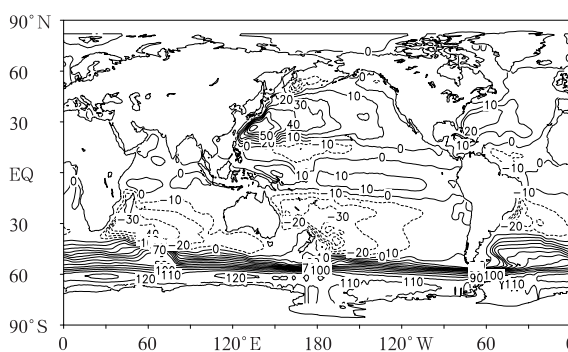


图 7 FGOALS-s 模拟的年平均全球大洋纬向平均经圈流函数(单位:Sv)

Fig. 7 Annual mean global zonally averaged meridional streamfunction in FGOALS-s (unit: Sv)



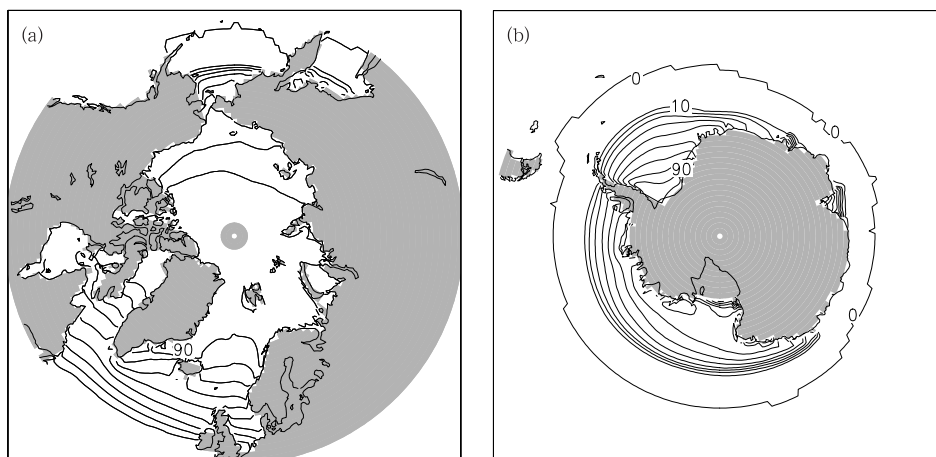


图 9 FGOALS-s 模拟的年平均北冰洋(a)和南极地区(b)的海冰密集度分布
(单位: %; 等值线间隔为 10)

Fig. 9 Annual mean sea ice concentration for the Arctic (a) and Antarctica (b) in FGOALS-s
(unit: %; the contour interval is 10)

($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$), Nino3.4 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}, 170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$), Nino4 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}, 160^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$) 指数时间序列。尽管耦合模式模拟的热带太平洋气候平均海温较之观测偏冷,但是模式中热带太平洋依然存在较强的年际变率信号。与观测相比, Nino1+2 区和 Nino3 区的海温距平振幅,较之观测要弱,观测中 1982~1983, 1997~1998 年两次暖事件的海温距平值都接近 4 K(图略),而在模拟结果中,暖事件的海温距平值都在 2 K 以下。较之赤道东太平洋海温的变化, Nino3.4 区的海温年际变率,在振幅上与观测比较接近,而 Nino4 区的海温变化,模式结果较之观测则振幅偏强。因此,耦合模式中赤道海温的年际变率,在强度上中西太平洋比中东太平洋要强。耦合模式模拟 El Nino 的常见问题,是其周期太规则,而 FGOALS-s 模拟结果的一个可喜之处,是其冷暖事件的振荡是非规则的,因而非常接近实际。

图 11 为耦合模式第 101~120 年逐月的 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 平均的降水率距平和 SST 距平分布。伴随着赤道太平洋暖事件的发生,赤道太平洋降水距平发生相应变化。正的降水距平分布,对应 SST 暖异常区,或者说暖海温异常导致相应区域的降水亦偏多。模拟结果的问题,在于暖海温异常的中心,多集中在赤道中西太平洋,由此导致降水异常的中心位置,亦相应地西移。而观测中 1981~2001 年期间,几次典型暖事件的 SST 距平中心,多集中在赤道中东太平洋(图略),例如 1982~1983 年、1987~1988 年、1997~1998 年的 3 次暖事件,它们所对应的降水变化中心集中在赤道中东太平洋。因此,较之观测,耦

合模式赤道中东太平洋的年际变率偏弱,导致相应的降水异常的中心位置亦有偏离。关于模式赤道中东太平洋年际变率较弱的原因,尚待进一步分析。

在中高纬度,气候系统的重要年际变率信号之一是北大西洋涛动 (NAO)^[44]。NAO 实际上是气团的大尺度跷跷板型的协调变化,其中心分别位于冰岛低压区和亚速尔高压区。NAO 是大西洋地区大气活动的主要模态,对整个北大西洋地区乃至北半球气候都有重要影响^[45,46]。近期研究表明,NAO 与中国气候变化也存在显著联系^[47,48]。对模式在 NAO 上的模拟能力进行检验是必要的。图 12 给出 FGOALS-s 模拟的北大西洋地区 DJFM 平均 500 hPa 位势高度场距平的第一个经验正交展开 (EOF) 模态,它解释了总方差的 44.3%。从大气活动中心的位置来看,耦合模式模拟的 NAO 空间型非常接近观测^[39]。NAO 空间型的分布,直接决定了与 NAO 变化相关联的气候异常的区域分布,FGOALS-s 在模拟 NAO 方面的令人较为满意的性能,为利用该耦合模式来开展与 NAO 相关的气候变率研究、以及海气相互作用研究(例如大洋热盐环流变率),奠定了很好的基础。

4 结 语

相对基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式的上一个版本 GOALS 而言,FGOALS-s 在许多方面进行了改进。主要有:采用了耦合器的框架,耦合模式系统实现了模块化、并行化;应用“非

通量调整”的直接耦合技术,使得海气耦合作用过程的模式描述更为真实。大气模式的分辨率由 R15L9 提高到 R42L26,物理过程模块也得到了更新,特别是该模式对东亚气候的模拟能力较之原有版本明显提高。海洋模式采用的是基于原来的 20 层海洋模式发展的 LASG/IAP 第 3 代大洋环流模式的高分辨率并行版本 LICOM、海冰模式和陆面模式

也更新为 NCAR CCSM2 的相应分量,这些分量模式的模拟能力较之原 GOALS 的相关分量明显增强。

分析表明,FGOALS-s 的 200 a 耦合积分,在经历了最初十几年的调整过程之后,耦合系统成功地控制了气候漂移趋势。耦合模式能够较为真实地模拟大气、海洋和陆面的气候平均态,特别是受益于大气模式的较高分辨率,由中国西南向东北延伸的夏

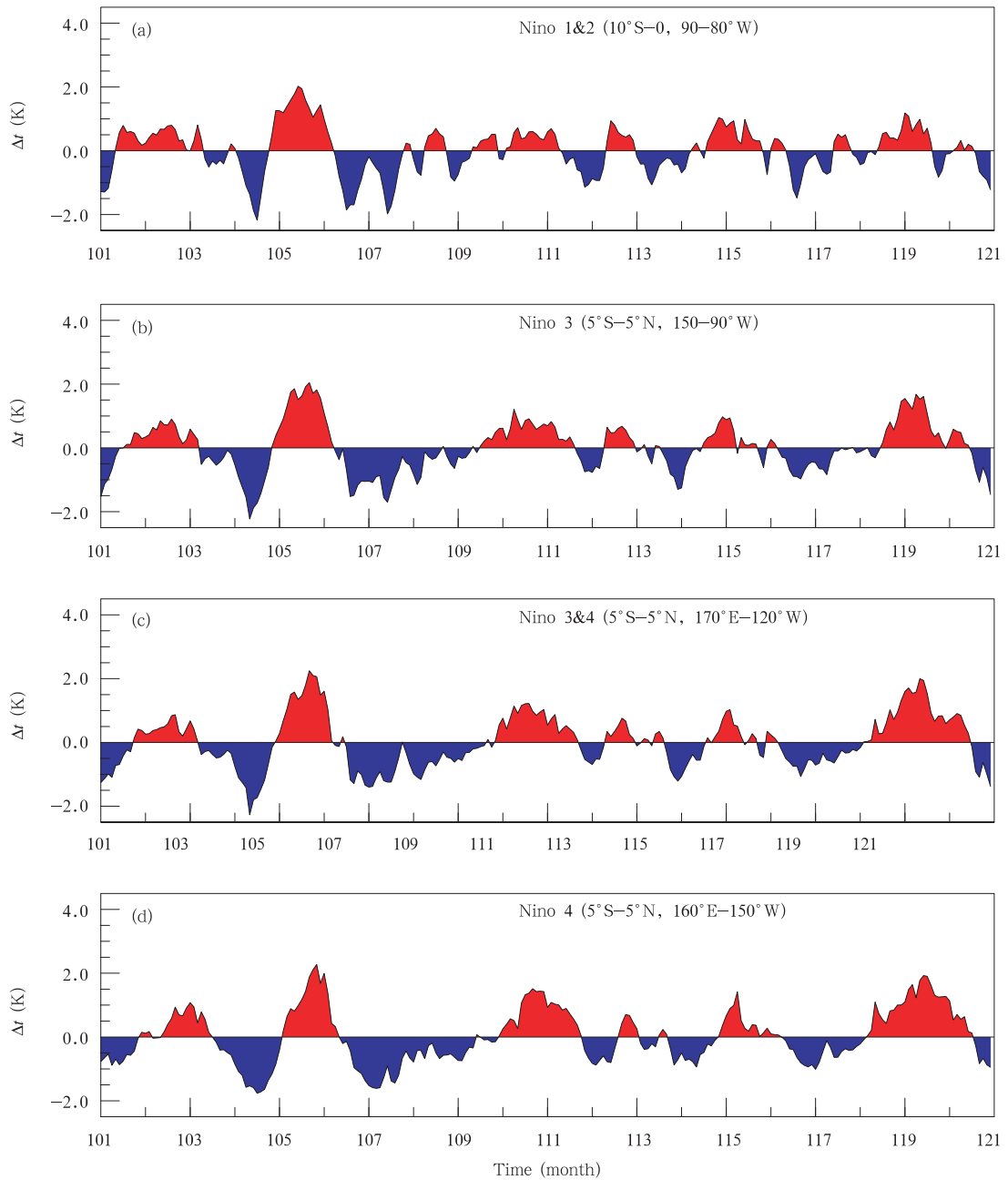


图 10 FGOALS-s 耦合积分第 101~120 年逐月的 Nino 指数序列(单位:K)

Fig. 10 Monthly Nino time series of SST anomalies for 101~120 model years of FGOALS-s (unit: K)

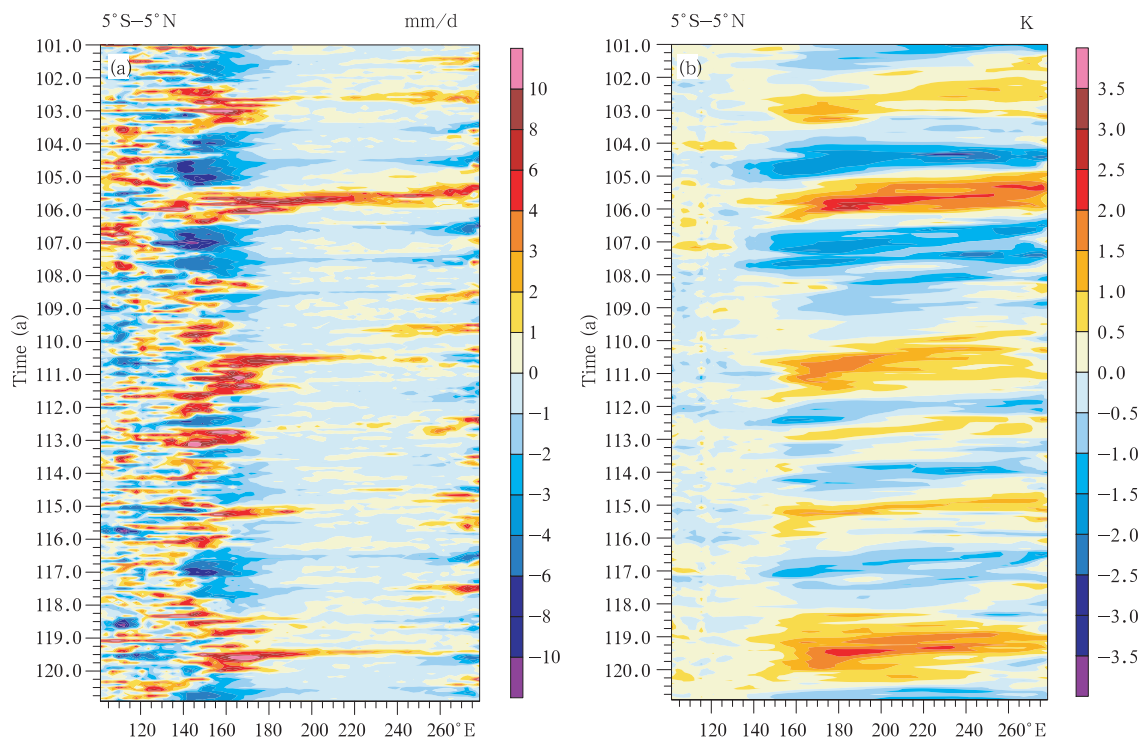


图 11 FGOALS-s 耦合积分第 101~120 年逐月 5°S~5°N 平均(a)降水率距平(单位:mm/d)和(b)SST 距平(单位:K)分布

Fig. 11 Monthly mean 5°S~5°N averaged (a) precipitation anomalies(unit:mm/d) and (b) SST anomalies (unit:K) for 101~120 model years of FGOALS-s

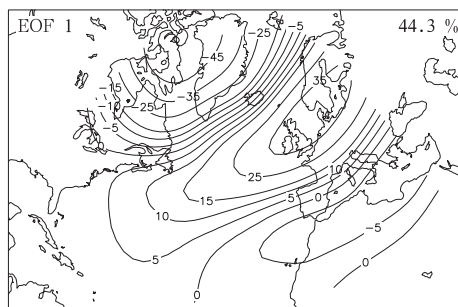


图 12 FGOALS-s 的 DJFM 平均 500 hPa 位势高度场距平的第一个 EOF 模态

Fig. 12 The first EOF mode of DJFM mean geopotential height anomalies of 500 hPa in FGOALS-s

季风雨带的分布,在模式中得到较为真实的再现。

关于赤道太平洋年际变率,耦合模式在能够成功地再现 El Niño 事件的非规则周期变化的同时,其年际变率的振幅,较之观测要弱。赤道中西太平洋年际变率的强度,较之赤道中东太平洋要强。关于中高纬度的年际变率,模式模拟的北大西洋涛动模态,在空间分布上非常接近观测。

FGOALS-s 模式存在的问题,主要是热带海温的模拟偏冷、而中纬度的海温则偏暖。进一步的分析表明,这种 SST 模拟上的偏差,主要来自模式模拟的云量分布的偏差,它直接影响到海表的净热通量收支。此外,耦合模式模拟的北大西洋高纬度地区的海温明显偏冷。海温模拟上的偏差,直接影响到对海冰的模拟,例如模拟的北大西洋海冰范围明显偏大,而受海温偏高影响,南极洲周围的海冰范围则偏少。因此,FGOALS-s 的未来工作重点,宜放在大气模式的云过程、海洋模式经向能量输送过程、以及海洋与大气的淡水通量耦合方法的改进方面。

FGOALS-s 的发展,是做为 LASG/IAP 新版本气候系统模式 FGOALS 的一个子版本进行的,其结果与 FGOALS 的其他版本如 FGOALS-g 的比较,将极大地丰富我们对影响耦合模式性能的关键大气过程的理解。而 LASG/IAP 基于同一耦合框架,开发不同版本的耦合模式这一工作思路,既为开展不同的耦合模式版本间的比较提供了便利(可比性高),也为在有限的人力和财力条件下实现耦合模式的可持续发展,打下了比较坚实的基础。

气候系统模式的发展,最终将走向地球系统模式。地球系统模式包括 3 个关键组成部分:物理气候系统、生物地球化学系统、与人类活动影响相关联的人文系统^[49]。发展地球系统模式的目的是借助它来研究大气、陆地和海洋之间的能量、动量和物质交换,了解行星能量过程、行星生态过程和行星新陈代谢过程的运行规律。地球系统模式的发展,将大大拓展气候学研究的范畴。但是,决定地球系统模式性能的关键组成部分,是其物理气候系统模块,亦即当前的气候系统模式。而气候系统模式的发展与完善,在可以预见的未来相当长的一段时间内,依然是我们工作的重点。

致谢:FGOALS-s 模式是 LASG/IAP 的集体研究成果, LASG/IAP 耦合模式课题组、大气谱模式、大气格点模式课题组对模式的发展起到了核心的作用。本文作者感谢张学洪研究员、王斌研究员、郭裕福研究员等对该模式发展的重要贡献。

参考文献

- [1] 张学洪,郭裕福,袁重光等. 中国科学院大气物理研究所环流模式(GCM)研究的成就. 见:陶诗言, Ricnes M R, 陈洋勤, Wang W C 主编. 温室效应与气候变化研究: 中国科学院、美国能源部“二氧化碳导致的气候变化”联合研究进展(1984—1999). 北京, 海洋出版社, 1999. 5—13
Zhang Xuehong, Guo Yufu, Yuan Chongguang. Achievements of Institute of Atmospheric Physics in the development of general circulation models. In: Tao Shiyan, Ricnes M R, Chen Bangin, Wang W C. eds. Greenhouse Effect and Climate Change: Progress of CAS-DOE Joint Research Project on CO₂-induced Climate Change. Beijing: Ocean Press, 1999. 5—13
- [2] 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 Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Global Ocean-Atmosphere-Land system of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. Quart J Appl Meteor (in Chinese), 1997; 8 (Suppl): 15—28
- [3] Zhang X H, Shi G Y, Liu H, et al. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 2000, 251pp
- [4] Stocker T F, Clarke G K C, Le Treut H, et al. Physical Climate Processes and Feedbacks. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution to Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2001. 473—581
- [5] 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 Tanjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al. The Atmospheric General Circulation Model SAMIL and the Associated Coupled Model FGOALS-s. Beijing: China Meteorological Press, 2005. 288pp
- [6] 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
- [7] Liu H, Wu G. 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
- [8] Liu H, Zhang X, Wu G. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM. Adv Atmos Sci, 1998, 15(3): 410—423
- [9] 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—168
Shao Hui, Qian Yongfu, Wang Qianqian. Impact of solar radiation diurnal cycle on the simulation results of R51L9. Plateau Meteorology (in Chinese), 1998, 17: 158—168
- [10] Wu T-W, Li u P, Wang Z-Z, et al. The Performance of Atmospheric Component Model R42L9 Of GOALS/LASG. Adv Atmos Sci, 2003, 20: 726—742
- [11] 王在志, 吴国雄, 吴统文等. ALGCM(R42)气候系统大气模式参考手册. 中科院大气物理所 LASG 技术报告(No. 14), 2004. 73pp
Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Wu Tongwen, et al. User's Guide and Reference Manual of the ALGCM (R42). Technical Report of LASG/IAP, No. 14, 2004. 73pp
- [12] 王在志, 吴国雄, 刘平, 吴统文. 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(3): 225—237
Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Liu Ping, et al. Development and performance of the AGCM component of a global ocean-land-atmosphere coupled model I: Impact of horizontal resolution. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2005, 21(3): 225—237
- [13] 王在志, 宇如聪, 王鹏飞等. 气候系统 GOALS/LASG 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(3): 238—247
Wang Zaizhi, Yu Rucong, Wang Pengfei, et al. Development and performance of the AGCM component of a global ocean-land-atmosphere coupled model II: Impact of vertical resolution. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2005, 21(3): 238—247
- [14] 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—1007

- Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. Coupled climate system model coupler review. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 2004, 28(6): 993–1007
- [15] 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
- [16] Kauffman B G, Large W G. The CCSM Coupler Version 5.01: Combined User's Guide, Source Code Reference and Scientific Description. National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307 U. S. A. 2002, 1–46
- [17] Edwards J M, Slingo A. Studies with a flexible new radiation code. I: choosing a configuration for a large-scale model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122: 689–720
- [18] 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
- [19] 戴福山. 东太平洋低云对海气耦合模式中“双复合带”的影响: [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2003. 102–145
- Dai Fu Shan. The Impact of Low-Level Cloud over the Eastern Subtropical Pacific on the “Double ITCZ”: [dissertation]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 102–145
- [20] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large scale models. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 1779–1800
- [21] Troen I, Mahrt L. A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensitivity to surface evaporation. *Bound-Layer Meteor*, 1986, 37: 129–148
- [22] Holtslag A A M, Boville B. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. *J Climate*, 1993, 6: 1825–1842
- [23] Palmer, et al. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122: 1001–1039
- [24] 钱永甫. 包络地形和重力波拖曳对气候模拟效果的影响. *应用气象学报*, 2000, 11: 13–20
- Qian Yongfu. Effects of envelope orography and gravity wave drag parameterization on the climate simulation. *Quart J Appl Meteor* (in Chinese), 2000, 11: 13–20
- [25] 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
- [26] Liu H L, Zhang X H, Li W, et al. An Eddy-Permitting Oceanic General Circulation Model and Its Preliminary Evaluation. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 675–690
- [27] Bonan G B, Oleson K W, Vertenstein M, et al. The land surface climatology of the Community Land Model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J Climate*, 2002, 15: 3123–3149
- [28] Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model. Version Three. NCAR Tech. Note NCARTN–463+STR, 2004. 70 pp
- [29] Boville B A, Gent P R. The NCAR Climate System Model, Version One. *J Climate*, 1998, 11: 1115–1130
- [30] Kiehl J T, Gent P R. The community Climate System Model, Version Two. *J Climate*, 2004, 17: 3666–3682
- [31] 王绍武. 气候系统引论. 北京: 气象出版社, 1994. 250pp
- Wang Shaowu. Introduction of Climate System. Beijing: Meteorology Press, 1994. 250pp
- [32] Xie P P, Arkin A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimations, and numerical model outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 2539–2558
- [33] Yu R, Li W, Zhang X, et al. Climate features related to eastern China summer rainfalls in the NCAR CCM3. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17: 503–518
- [34] Mechoso C R, et al. The seasonal cycle over the tropical Pacific in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 2825–2838
- [35] 周天军, 张学洪, 王绍武. 大洋温盐环流与气候变率的关系研究. *科学通报*, 2000, 45(4): 421–425
- Zhou Tianjun Zhang Xuehong, Wang Shaowu. The relationship between the thermohaline circulation and climate variability. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 2000, 45(11): 1052–1056
- [36] Meehl G A, Collins W D, Boville B, et al. Response of the NCAR Climate System Model to increased CO₂ and the role of physical processes. *J Clim*, 2000, 13: 1879–1898
- [37] Bryan F O. Climate drift in a multi-century integration of the NCAR Climate System Model. *J Clim*, 1998, 11: 1455–1471.
- [38] Manabe S, Stouffer R J. Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. *J Climate*, 1994, 7(1): 5–23
- [39] 周天军. 全球海气耦合模式中热盐环流对大气强迫的响应. *气象学报*, 2003, 61(2): 164–179
- Zhou Tianjun. Adjustment of the North Atlantic thermohaline circulation to the atmospheric forcing in a global air-sea coupled model. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 2003, 61(2): 164–179
- [40] Talley L D, Reid J L, Robbins P E. Data-based meridional overturning streamfunctions for the global ocean. *J Climate*, 2003, 16: 3213–3226

- [41] Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, et al. Response of IAP/LASG GOALS model to the coupling of air-sea freshwater exchange. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17(3): 473—486
- [42] Lambert S J, Boer G J. CMIPl evaluation and inter-comparison of coupled climate models. *Clim Dyn*, 2001, 17: 83~106
- [43] Read J F, Pollard R T. Structure and transport of the Antarctic circumpolar current and Agulhas return current at 40E. *J Geophys Res*, 1993, 98: 12281—12295
- [44] 龚道溢, 周天军, 王绍武. 大西洋涛动变率研究进展. *地球科学进展*, 2001, 3: 413~420
Gong Daoyi, Zhou Tianjun, Wang Shaowu. Advances in the studies on North Atlantic oscillation. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 2001, 3: 413—420
- [45] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, 1995, 269: 676—679
- [46] Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Yu Rucong, Yu Yongqiang, Wang Shaowu. The North Atlantic oscillation simulated by Version 2 and 4 of IAP/LASG GOALS model. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17(4): 601—616
- [47] Yu Rucong, Zhou Tianjun. Impacts of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L12204, doi:10.1029/2004GL019814
- [48] Li Jian, Yu Rucong, Zhou Tianjun, Bin Wang. Why is there an early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau? *J Climate*, 2005, 18: (in press)
- [49] 王会军, 徐永福, 周天军, 陈洪滨, 高守亭, 王普才, 陆日宇, 张美根. 大气科学: 一个充满活力的前沿科学. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 31~38
Wang Huijun, Xu Yongfu, Zhou Tianjun, et al. Atmospheric Science: A vigorous frontier science. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 2004, 19(4): 31—38

THE CLIMATE SYSTEM MODEL FGOALS-s USING LASG/IAP SPECTRAL AGCM SAMIL AS ITS ATMOSPHERIC COMPONENT

Zhou Tianjun Wang Zaizhi Yu Rucong Yu Yongqiang Liu Yimin
Liu Hailong Bao Qing Wang Pengfei Li Wei Wu Guoxiong

(LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Wu Tongwen

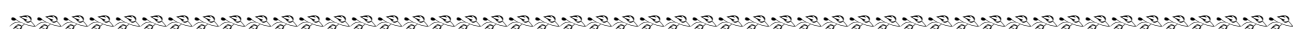
(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract

This paper describes the development and framework of a new version of LASG/IAP climate system model namely FGOALS-s (Flexible Global Ocean Atmosphere Land System model-Spectral version), which employs the recently improved version of IAP/LASG spectral AGCM namely SAMIL as its atmospheric component. With the motivation of developing a state-of-the-art coupled climate system model suitable for East Asian monsoon climate simulations, the atmospheric component of FGOALS-s, viz. SAMIL, employs a horizontal resolution of R42, which is equivalent to $2.8125^{\circ}(\text{longitude}) \times 1.66^{\circ}(\text{latitude})$. The performances of FGOALS-s in simulating the climate mean states of the atmosphere, land surface, ocean, and sea-ice were evaluated using the output of a 200-years control run of FGOALS-s. The interannual variability of the tropical Pacific and the mode of North Atlantic Oscillation were also analyzed. The results indicate that the FGOALS-s model has been succeeded in controlling the long-term climate drift and has acceptable performances in realistically reproducing the climate mean states of the atmosphere, ocean and land surface. Of particular important, benefit from the relatively high horizontal resolution of the AGCM component, the observed southwest-northeastward extension of the main summertime rainbelt over East China is reasonably well reproduced in FGOALS-s, indicating the excellent performance of the model in East Asian summer monsoon simulations. One common problem of many coupled ocean-atmosphere models is that the ENSO variability usually tends to be more regular than nature's, the FGOALS-s model, however, successfully reproduces an irregular ENSO cycle, although its amplitude is slightly weaker than the observation. In addition, the simulated interannual variability of the equatorial middle and western Pacific is

stronger than that of the equatorial middle and eastern Pacific. In addition, the model also has reasonably well performance in reproducing the North Atlantic Oscillation mode, which is the dominant mode of wintertime climate over not only the North Atlantic domain but also the Northern Hemisphere. The main deficiency of the FGOALS-s model is that the simulated tropical SSTs are colder than the observation, while the middle latitudes are warmer than the observation. The deficiency in SST simulations has proved to be the results of the bias in net sea surface heat flux simulations, which is to great extent dominated by the bias of cloud amount simulations. Another typical deficiency of the FGOALS-s model is that the SSTs at high latitudes of North Atlantic are too cold, which leads to a larger sea-ice concentration than the observation in terms of annual mean state. In the mean time, the simulated warmer SSTs surrounding the Antarctic result in less sea-ice cover over there. Future improvements of the FGOALS-s model should focus on the treatment of cloud process in the AGCM, the meridional heat transport process of the OGCM, and the tuning of the air-sea freshwater coupling scheme.

Key words: Climate system model FGOALS-s, Atmospheric general circulation model SAMIL, Climate mean state, Interannual variability.



欢迎订阅 2006 年度《气象学报》

《气象学报》创刊于 1925 年,是由中国气象学会主办的全国性大气科学学术性期刊,旨在反映我国大气科学领域中最新科研成果,为大气科学研究提供学术交流阵地,以推动我国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于我国气象现代化建设事业。

《气象学报》以气象、水文、海洋及环境等相关学科的科研与业务人员和高等院校师生为主要读者对象,主要刊登大气科学各分支学科的创造性论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;大气科学新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;大气科学研究工作简报及重要学术会议报道;国内优秀大气科学专著的评介。

为适应我国大气科学的迅速发展,2006 年《气象学报》将以最快的速度反映气象科技工作者的最新研究成果。

读者可直接与编辑部联系订阅。

《气象学报》编辑部

2006 年《气象学报》征订单

订购单位 地 址								
联系人姓名		邮 编				邮汇地址		
《气象学报》(双月刊)						单价: 30 元	全年订价:180 元 (免邮寄费)	邮编:100081 地址:北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会秘书处《气象 学报》编辑部 电话:68406942,68408571 E-mail:cmsqxxb@263.net
1 期	2 期	3 期	4 期	5 期	6 期	订 数	总 计 金 额	
合计金额大写: 仟 佰 拾 元								