

气候系统模式 FGOALS_g1 模拟的 20 世纪气温变化^{* 1}

满文敏^{1,2} 周天军¹ 张洁^{1,2} 吴波^{1,2}

MAN Wenmin^{1,2} ZHOU Tianjun¹ ZHANG Jie^{1,2} WU Bo^{1,2}

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(LASG),北京 100029
2. 中国科学院研究生院,北京 100049

1. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

2009-07-29 收稿,2009-09-27 改回.

Man Wenmin, Zhou Tianjun, Zhang Jie, Wu Bo. 2011. The temperature evolution during the 20th century as simulated by the climate system model FGOALS-gl. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(4):644-654

Abstract The performance of the fast version of the LASG/IAP coupled climate system model named FGOALS_g1 in simulating the 20th century air temperature evolution is evaluated and the mechanisms responsible for the evolution are discussed. The overall warming trend and its zonal distribution simulated by the FGOALS_g1 is in a good agreement with the observation. Under the natural forcings, such as the solar radiation and volcanic activities, and the anthropogenic forcings, such as greenhouse gases and aerosols, the FGOALS_g1 model reasonably simulates the warming trend of the global mean temperature and its decadal variability. Moreover, the FGOALS_g1 reproduces the major local warming characteristics over most of the world, except for the North Atlantic, suggesting that the external forcings significantly contribute to the temperature evolution over most of the world. The main deficiency of the model is that the simulated global warming trend is weaker than the observation. It may be associated with low model sensitivity to the specified greenhouse gases forcing. Generally speaking, the FGOALS_g1 model can reasonably reproduce the main characteristics of the 20th century temperature evolution, especially on the global, hemispheric, and continental scale.

Key words Coupled general circulation model, 20th century air temperature evolution, Model evaluation

摘要 分析了中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG/IAP)发展的快速耦合气候系统模式 FGOALS_g1 对近 100 年气温变化的模拟,讨论了 20 世纪气温变化的机理。结果表明,在自然因素和人为因素的共同强迫作用下,FGOALS_g1 能够合理再现 20 世纪全球平均和纬向平均地表气温随时间的演变。利用太阳辐照度等自然强迫、温室气体和气溶胶等人为强迫因子来驱动耦合模式,能够模拟出过去 100 年全球平均气温的增温趋势和年代际变化。耦合模式可以较好地模拟出 20 世纪全球气温变化趋势的空间分布。对区域气温变化模拟效果的分析表明,除北大西洋外,FGOALS_g1 对其他地区具有较高的模拟技巧,表明外强迫是造成多数地区气温变化的主要原因。FGOALS_g1 的主要缺陷在于模拟的变暖强度偏弱,大气模式自身的偏差以及耦合模式对温室气体响应的敏感度偏低是造成上述缺陷的主要原因。总体而言,FGOALS_g1 对 20 世纪气温变化的模拟效果较为理想,特别是在全球、半球和大陆尺度上,该模式对过去 100 年气温变化的模拟较为合理。

关键词 气候系统模式, 20 世纪气温变化, 模式评估

中图法分类号 P46

* 资助课题:国家自然科学基金(40890054,40675050,40821092)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706010、GYHY200806010)。
作者简介:满文敏,主要从事气候模拟研究。E-mail: manwenmin@mail.iap.ac.cn

1 引言

近 100 年来的全球变暖已经成为一个众所周知的事实。2007 年发表的政府间气候变化委员会 (IPCC) 第 4 次评估报告 (AR4) 指出, 20 世纪 (1906—2005 年) 以来全球平均气温约上升了 0.74 (0.56—0.92) °C, 并预估 21 世纪全球还将继续升温 (IPCC, 2007)。认识近 100 年的气候变化, 需要放在过去千年气候演变的背景之下。近年来, 过去千年气候作为 20 世纪变暖的前期背景, 其重要性已为学术界所共识 (周天军等, 2009)。

应对气候变化需要开展气候变化检测和归因研究。气候模式是气候变化机理研究的重要工具。利用自然和人为强迫因子驱动气候模式, 并把模拟结果与观测 (或重建) 结果进行比较, 是理解气候演变机理的重要方法。目前, 世界上一些主要的气候模拟中心, 已经开始利用气候系统模式来模拟过去千年的气候状况 (Zorita, et al, 2003; Gonzalez-Rouco, et al, 2003; 刘健等, 2005; Xu, et al, 2007; 况雪源等, 2009)。

三维“海-陆-气-冰”耦合的气候系统模式是开展气候变化归因研究的重要工具, 但对于千年积分模拟来说, 三维耦合模式的计算代价很大。一个重要解决方法就是发展快速耦合模式, 即在保证模式物理过程不变的基础上适当降低模式的分辨率。目前, 世界上一些主要的气候模拟中心都在发展快速耦合模式, 并将其用于长于 1000 a 的控制试验积分 (Manabe, et al, 1996; von Storch, et al, 1997; Li, et al, 2003; Jones, et al, 2005)。

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) 长期以来致力于气候系统模式的发展, 并将其应用于气候变化研究 (Ma, et al, 2004; 周天军等, 2005a; Zhou, et al, 2007; Yu, et al, 2008)。近年来, 为了适应千年气候模拟的需要, LASG 发展了全球“海-陆-气-冰”耦合模式的低分辨率快速耦合版本 FGOALS_gl, 并利用其进行了 1000 a 的控制试验积分 (Zhou, et al, 2008a)。结果表明, 模式可以较好地模拟出大气环流的气候态特征以及气候系统内部变率, 其气候模拟能力得到有效验证。FGOALS_gl 可被用于过去千年气候演变的模拟研究。

成功模拟千年气候的前提是模式能较好地模拟

20 世纪气候, 20 世纪气候模拟是检验气候系统模式性能的“标准”试验之一。此前已有诸多研究表明, 在考虑人为温室气体排放和硫酸盐气溶胶作用的前提下, 气候系统模式能够比较成功地模拟出 20 世纪后期的全球变暖 (Stouffer, et al, 1994; Santer, et al, 1996; Tett, et al, 1999; Ma, et al, 2004; Zhou, et al, 2006)。FGOALS_gl 对 20 世纪气候的模拟能力如何, 此前尚未有检验。

本文的主要目的是考察 FGOALS_gl 对 20 世纪气候变化的模拟能力, 通过与观测的比较, 重点检查模式对全球平均地表气温时间演变特征、纬向平均地表气温和地表气温变化趋势空间分布的模拟。此外, 在关注全球、半球尺度气温变化的同时, 本文还将考察 FGOALS_gl 对区域气温演变的模拟能力。对上述问题的考察, 是未来利用该模式开展千年气候变化模拟的基础。同时, 对上述问题的回答, 亦有助于理解自然和人为外强迫在上述不同空间尺度气温变化中的作用。

2 模式和方法介绍

快速耦合版本的气候系统模式 FGOALS_gl 是 LASG 新一代气候系统模式 FGOALS 的组成部分 (Zhou, et al, 2007, 2008a; Yu, et al, 2008), 包括 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。FGOALS_gl 的大气部分为 LASG/IAP 发展的格点大气模式 GAMIL 的低分辨率版本, 水平分辨率相当于 5.0° 经度 × 4.0° 纬度 (Wen, et al, 2007), 垂直方向采用 $\sigma-p$ 混合坐标系, 分为 26 层。模式动力框架保持了总质量、总有效能量守恒 (Wang, et al, 2004), 物理过程参数化方案主要来自美国国家大气研究中心 (NCAR) 的大气模式 CAM2 (Collins, et al, 2003)。海洋模式采用 LICOM, 它是对 LASG/IAP 第 3 代全球大洋环流模式 L30T63 (Jin, et al, 1999) 的水平分辨率进行提高而形成的新版本 (Liu, et al, 2004), 水平分辨率为 1° × 1°, 垂直方向为 30 层, 范围为准全球 (北冰洋被处理成孤岛)。LICOM 采用了非刚盖近似的完全原始方程模式和相应的守恒差分方案 (Liu, et al, 2004)。耦合模式的陆面和海冰分量分别采用 NCAR 发展的通用陆面模式 CLM (Bonan, et al, 2002) 和海冰模式 CSIM (Briegleb,

et al., 2004)。

耦合模式进行了 145 a 的完全海-陆-气-冰耦合积分。耦合积分的初始场,采用 1860 控制试验第 30 年 1 月 1 日的瞬时场。1860 控制试验是指将太阳辐照度、温室气体浓度等外强迫场固定为工业革命前水平而进行的耦合积分,前 30 年作为模式起转积分。耦合模式采用 IPCC AR4 提供的历史大气辐射强迫场,包括自然因子(太阳辐射、火山气溶胶)和人为因子(温室气体、硫酸盐气溶胶等)。本文选取第 22—141 模式年的逐月积分结果进行分析。

作为观测证据,本文使用的全球地表气温资料是 HadCRUT3v (Brohan, et al., 2006),其水平分辨率为 $5.0^{\circ} \times 5.0^{\circ}$,时间跨度为 1850 年 1 月至 2006 年 2 月。中国区域 1951—2000 年的观测序列来自中国气象局提供的 160 站观测资料,1881—1950 年的地表气温资料来自王绍武等(2002)的重建资料。

3 结果分析

3.1 全球平均地表气温随时间的演变

图 1 给出观测和模拟的 1881—2000 年全球平均地表气温距平(相对于 1961—1990 年平均值)随时间的演变。观测资料显示,20 世纪地表气温的演变过程包括:1910—1940 年的变暖、1940—1970 年的微弱变冷、以及 1970 年以后的变暖。在自然因子和人为因子的共同强迫下,模式能够较好地再现 20 世纪地表气温的演变过程,模拟和观测的相关系数达到 0.76,通过了 5% 显著性检验。1970 年以后,观测的地表气温上升速度为 $0.476^{\circ}\text{C}/(30\text{ a})$,模式模拟的上升速度为 $0.341^{\circ}\text{C}/(30\text{ a})$,略低于观测。

为检验模式模拟技巧的年代际差异,对观测和模拟的全球平均地表气温序列做 21 a 滑动相关(图 2),1890—1910 年模拟结果与观测为负相关,1910—1940 年相关系数较高,接近 5% 显著性水平,1940—1970 年相关系数较低,1970 年以后迅速增加,达到 5% 显著性水平,并在 1980 年前后达到峰值。可见,模拟技巧的变化与地表气温的演变过程一致,变暖期的模拟技巧一般高于变冷期。李立娟等(2007)的研究表明,冷期大气内部噪音往往会掩盖外强迫对温度变化的影响,使得模式难以再现实际的冷变化。大气内部噪音的影响在变冷期较之变暖期更显著,从而使得变暖期的模拟技巧高于变冷期。此外,无论是太阳辐照度强迫场资料、还是全球

平均气温重建序列,1900 年这个时段的误差都比较大,这也是影响模拟和重建序列相关性的因素之一。

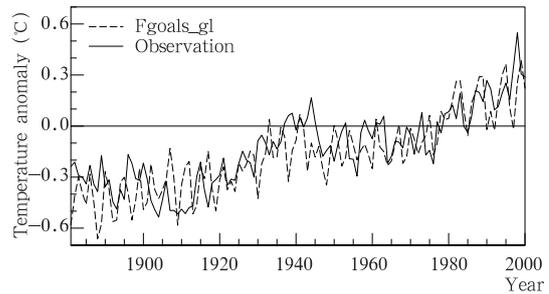


图 1 全球平均地表气温距平随时间的演变
(相对于 1961—1990 年;实线为
HadCRUT3v 器测资料,虚线为模拟)

Fig. 1 Global annual mean air temperature anomaly time series from the observations (HadCRUT3v, solid lines) and the model historical forcing run (dashed lines), with those of the period 1961—1990 as references

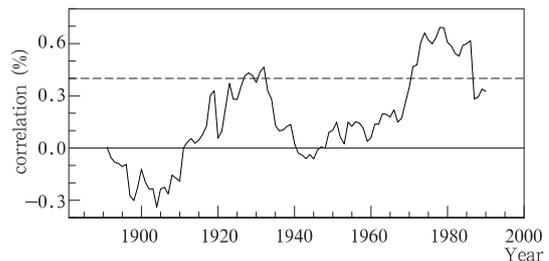


图 2 观测和模拟的全球平均地表气温序列的 21 a 滑动相关(虚线表示显著性水平为 5% 的置信度)
Fig. 2 21-year sliding correlation between the observed and simulated global annual mean surface air temperature time series
(The dashed line denotes a confidence level of 5%)

观测和模拟在不同时间尺度上的相关,能够反映出外强迫在气候变化中的作用(Stott, et al., 2000)。由图 1 可知,观测和模拟的地表气温序列具有很高的相关系数,而两个序列的首要特征是增温趋势,至于二者之间的高相关系数,是否完全来自这种准线性趋势,则参照常用作法(Zhou, et al., 2006; 李立娟等, 2007),分别将观测和模拟序列分解成 3 个部分:线性趋势、年代际(低频)和年际(高频)变化部分,然后分别检验模式在 3 个时间尺度上的模拟技巧。为了得到年代际和年际变化,分别对序列进行低通(10 a 以上)和高通(1—10 a)滤波。观测和模拟的原始序列间的相关系数为 0.76,去倾

后结果为 0.25,而其中低频年代际变化部分的相关系数为 0.58,年际变率部分的相关系数只有 0.02,只有原始序列和年代际变化部分的相关系数通过了 5%显著性检验。因此,外强迫对过去 100 年的增暖趋势、温度年代际变化具有显著贡献,而对于年际变率的影响不显著。该结果与 HadCM3 模拟得到的结论一致(Stott, et al, 2000)。

关于年际变率模拟效果不佳的原因,由于气候系统最为显著的年际变率信号表现为 ENSO,全球平均气温序列年际变化的很大一部分来自 ENSO 的影响,此前有研究表明(Dai, et al, 2001),在类似 20 世纪气候模拟这样的试验中,模式模拟的 ENSO 和实际观测在时间上基本没有对应关系,这使得在

年际变率尺度上,模拟的全球平均气温序列和观测结果的相关性不显著。本文的结果某种程度上也说明了这个问题。

为进一步比较模式在不同时间尺度上的模拟技巧,对观测和模拟的全球平均地表温度序列做 Morlet 小波分析(图 3)。观测资料存在显著的年际(2 和 5 a 的周期)、年代际变率(10、20 和 40 a 的周期)。模式能够较好地再现气温在年际和年代际尺度上的变化,但观测中 20 a 左右的周期在模拟结果中偏弱,模拟的年际变率比观测偏强。另外,模拟的年际周期变化是不稳定的,如在 1881—1910、1930—1940、1980—2000 年,存在显著的 5 a 周期变化,其他年份则不明显,而观测的年际周期变化是稳定的。

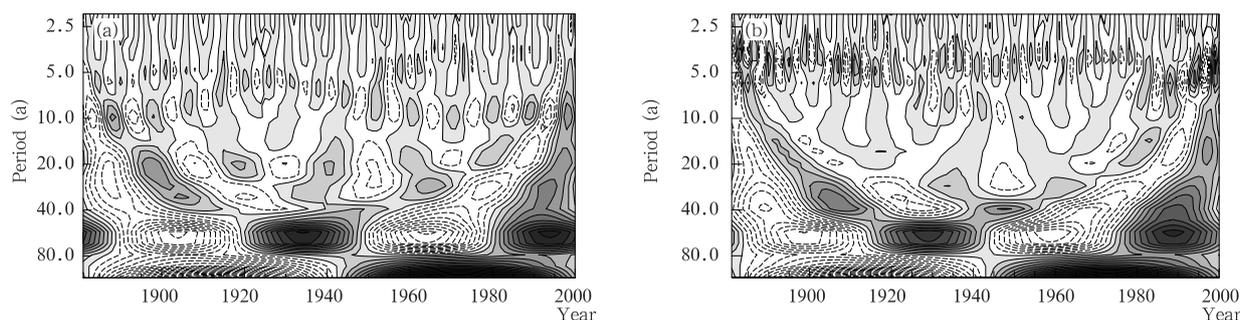


图 3 观测和模拟的全球平均地表气温的 Morlet 小波分析(a. 观测, b. 模拟)

Fig. 3 Wavelet power spectrum of (a) the observed and (b) simulated global annual mean surface air temperature based on the Morlet wavelet analysis

总之,在给定的自然因子和人为因子的共同强迫作用下,FGOALS_gl 耦合模式不仅可以模拟出过去 100 年的全球增温趋势,而且对全球气温的年代际尺度变化亦有一定的模拟能力。因此,自然因素和人类活动对 20 世纪气温变化的贡献是显著的。

3.2 纬向平均地表气温距平随时间的演变

上文讨论的只是全球平均情况,图 4 进一步给出纬向平均地表气温距平随时间的演变。观测资料

显示,20 世纪发生了两次变暖:第 1 次发生在 1910—1940 年,第 2 次发生在 1980 年以后,增暖区域几乎覆盖全球,增幅最强的区域位于北半球中高纬度(30°N 以北)。模拟结果与观测资料基本一致,分别在 1910—1940 年和 1980 年以后发生两次变暖,只是增暖的范围和幅度都比观测偏小,这与给定实际历史海温强迫下格点大气模式 GAMIL 的模拟结果一致(李立娟等,2007)。

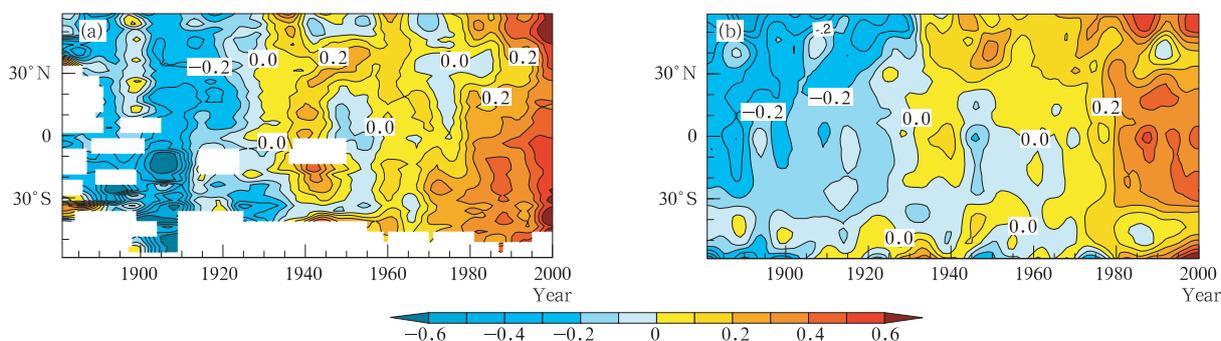


图 4 观测和模拟的纬向平均地表气温距平(单位:°C)随时间的演变(a. 观测, b. 模拟)

Fig. 4 Zonal mean surface air temperature anomalies from (a) the observation and (b) the simulation

对于第1次变暖的原因目前尚有争议, Delworth等(2000)利用GFDL耦合模式对20世纪气候进行集合模拟,认为主要是模式内部变率的作用,而GAMIL的结果则显示模式内部变率贡献很小,主要是外强迫的影响。近年来,愈来愈多的耦合模拟试验表明,20世纪早期的这次变暖主要是由太阳辐射的年代际变化引起的,此外这段时间火山活动沉寂亦有贡献(Tett, et al, 1999; Stott, et al, 2000; Meehl, et al, 2003)。对于第2次变暖,目前认为主要是温室气体增加的结果,尽管自然变率亦有贡献(Santer, et al, 1996; Tett, et al, 1999; Stott, et al, 2000)。

3.3 地表气温变化速度的空间分布和季节演变

气温变化速度与选取时段有关,图5为观测和模拟的1949—2000年以及1901—2000年全球地表气温的变化速度($^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$)分布。1949—2000年观测温度的变化速度(图5a)表现为北半球中高纬度

地区增温速度最大($2\text{—}4^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$),印度洋/西太平洋暖池区、澳大利亚、赤道东太平洋以及南大西洋(30°S 以北)等区域增温速度次之($1\text{—}2^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$),而北太平洋、北大西洋北部、美国东南部、赤道非洲地区以及其他一些小范围区域的气温则有下降趋势。在模拟结果中(图5b),全球大部分地区气温升高,但模式不能再现观测中北半球中高纬度地区的强烈增温,如欧洲、北亚、加拿大西北部的增温速度均比观测偏弱;印度洋/西太平洋暖池区、赤道东太平洋以及南大西洋的增温速度亦小于观测;北太平洋、北大西洋以及美国东南部的气温呈下降趋势,但北大西洋变冷区的位置较观测偏南。然而,模式模拟的南亚、澳大利亚和赤道非洲地区的增温速度较观测偏大。可见,除少数地区外,FGOALS_g1模拟的大部分地区的增温速度比观测偏弱。Knutson等(2005)利用耦合模式GFDL CM2的模拟结果同样表明,除少数地区增温趋势较观测偏强外,其他大部

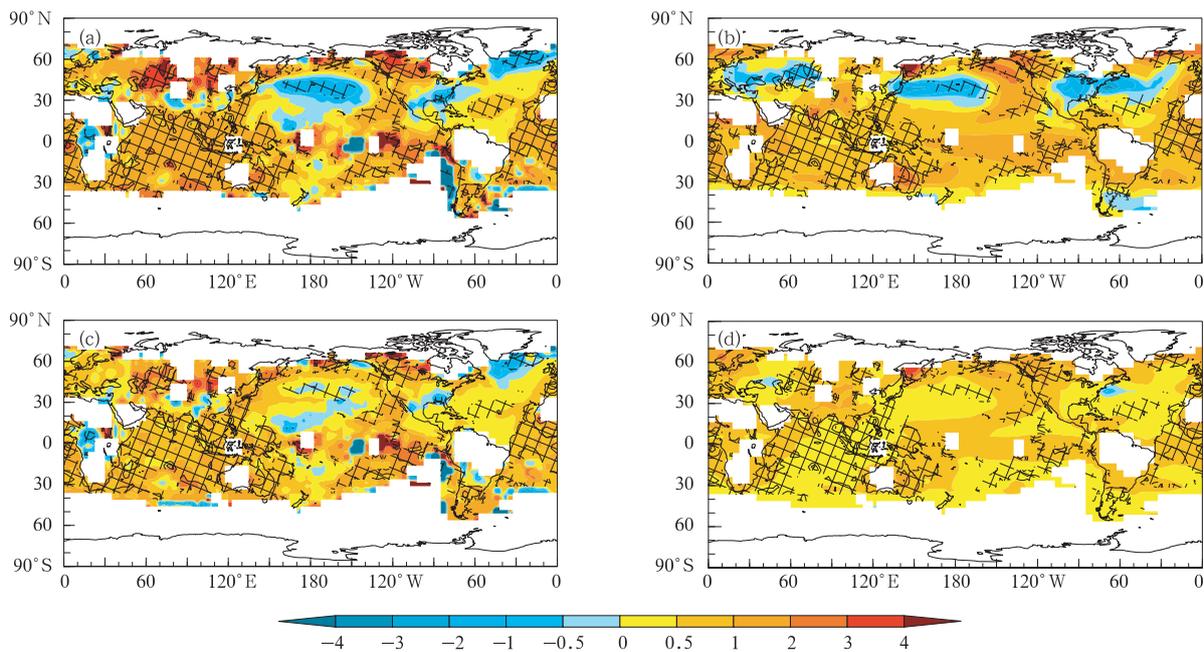


图5 全球平均地表气温的变化速度(单位: $^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$; a. 观测(1949—2000年), b. 模拟(1949—2000年), c. 观测(1901—2000年), d. 模拟(1901—2000年); 阴影为通过5%显著性检验的区域)

Fig. 5 (a) Observed mean surface air temperature trends (1949—2000) in $^{\circ}\text{C}/100\text{ year}$, (b) Simulated mean surface air temperature trends for 1949—2000, and (c) — (d), as in Fig. (a) and (b) but for 1901—2000. (The shaded areas are statistically significant at the 5% level)

分地区的增温速度较观测偏小。

究竟是何原因导致模式模拟的增温速度较之观测偏小,分析认为,耦合模式的偏差来自多个方面,大气模式分量的性能及耦合过程本身都会对模拟结果产生很大影响。单独大气模式GAMIL的模拟结

果表明,模式对两次变暖速度的模拟都偏小,大气模式自身的偏差可能是原因之一(李立娟等,2007)。另外,利用FGOALS_g1进行的 CO_2 浓度加倍试验表明,当 CO_2 浓度加倍时,全球平均地表气温约上升 1.2°C (张洁提供,个人通信),而IPCC AR4给出

的可能范围是 1.5—4.5℃ (IPCC, 2007), 因此, FGOALS_gl 模拟的气温变化速度偏小可能与其对温室气体的响应敏感度较低有关。

观测中 1901—2000 年全球地表气温的变化速度(图 5c)与 1949—2000 年类似, 除北太平洋、北大西洋北部及美国东南部温度呈下降趋势外, 全球大部分地区以增温为主, 但增温速度上小于近 50 年,

其原因可能在于近 50 年温室气体的作用更为显著 (Zhou, et al, 2006)。模式基本模拟出了全球大范围区域的变暖(图 5d), 但没有合理再现观测中少数区域的变冷趋势, 如北太平洋、北大西洋北部及美国东南部地区。

进一步考察近 50 年(1949—2000 年)全球地表气温变化趋势在不同季节的分布(图 6)。观测中,

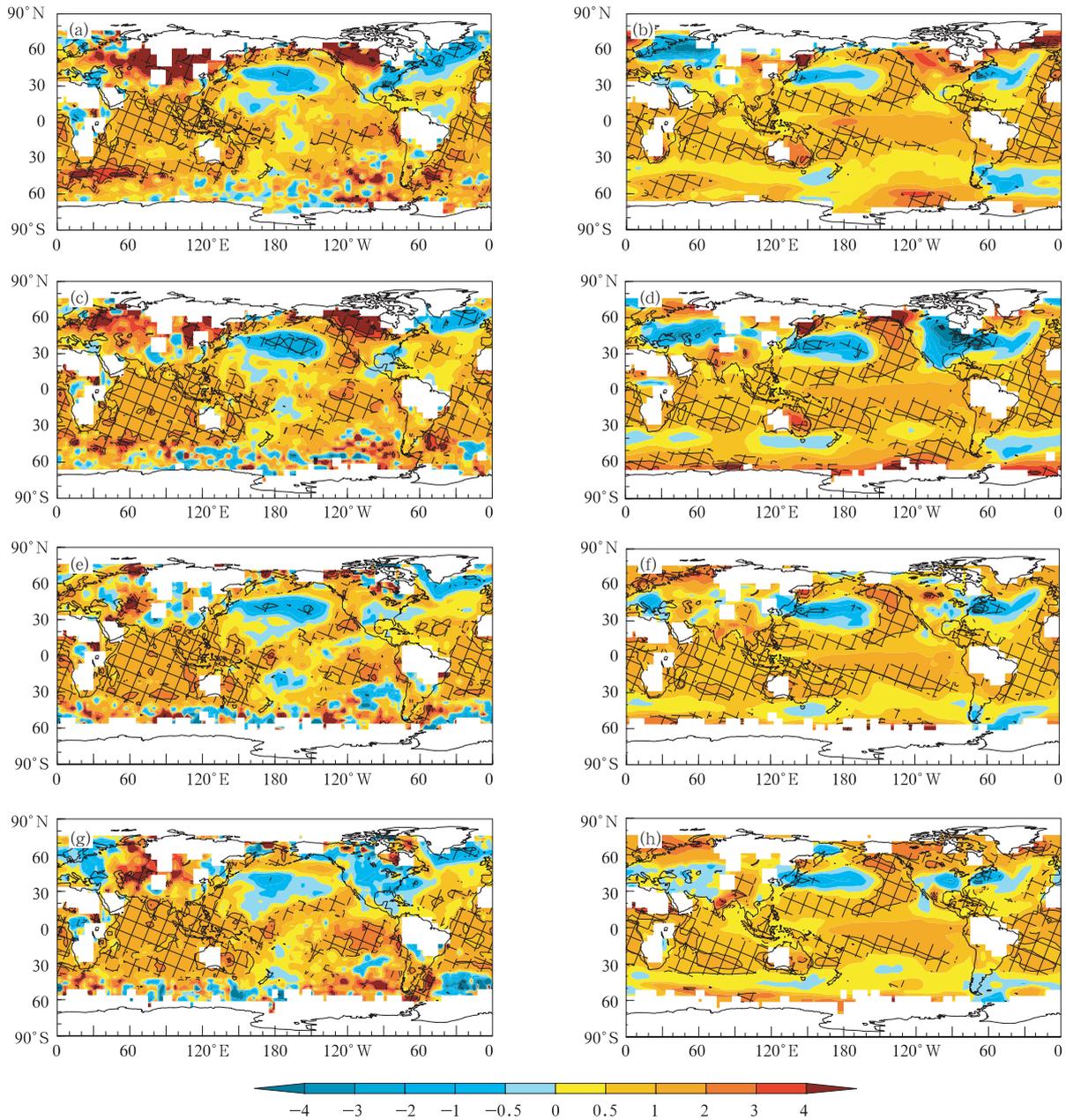


图 6 同图 5, 但为季节演变情况 (a, b. 冬季(DJF), c, d. 春季(MAM), e, f. 夏季(JJA), g, h. 秋季(SON); a, c, e, g. 观测; b, d, f, h. 模拟; 各季节的年限同图 5a-b, 阴影为通过 5% 显著性检验的区域)
 Fig. 6 As in Fig. 5 but for the separate 3-month seasons: (a)/(b) DJF, (c)/(d) MAM, (e)/(f) JJA, and (g)/(h) SON, (a, c, e, g) and (b, d, f, h) are for the observed and the simulated results, respectively
 The shaded areas are statistically significant at the 5% level

北半球中高纬度陆地区域的增温速度在冬季和春季达到最大,在夏季和秋季速度减小,而模式模拟的增温速度各季节无明显差别,从而使得在冬、春两季模拟与观测的差异大于夏、秋两季。这可能与模式在高纬度地区模拟的海冰偏多有关。全球变暖使得冬春季积雪减少,降低反照率,造成增温速度在冬季和春季达到最大(Bauer, et al, 2006),但耦合模式在高纬度地区模拟的海冰偏多,且季节差异不明显(图略),导致模拟的温度变化的季节差异偏弱。此外,平流层气溶胶的动力作用可能亦有贡献。平流层气溶胶可以通过对太阳近红外辐射的吸收使得平流层下部变暖,下部平流层的变暖在热带地区远大于极区,这种纬向温度梯度能够调整大气动力过程,使得中高纬度西风带加强,平流输送超过辐射效应,造成北半球中高纬度陆地区域冬季变暖增强(Rind, et al, 1992; Graf, et al, 1993; Shindell, et al, 2001; 石广玉, 2007)。耦合模式未考虑平流层火山气溶

胶的影响,因此无法再现这种由于动力作用引起的变暖,进而导致模拟的季节差异偏弱。北太平洋的变冷在观测和模拟中各个季节都存在,并且强度相似,GFDL CM2 的结论与此一致(Knutson, et al, 2005)。观测中北大西洋北部各个季节都出现的变冷在模拟中位置要偏南一些,但各季节速度无明显变化。

3.4 区域气温演变

考察全球地表气温的趋势分布可以有效揭示气温变化的空间分布等特征,但趋势变化对起止时段的选择比较敏感,而这种选择往往主观性较强。克服这一缺陷的有效途径是将模拟和观测的地表气温演变序列直接进行比较。参照 Knutson 等(2005),本文进一步考察全球 9 个区域的气温变化(图 7),9 个区域分别是北半球热带外地区、南半球热带外地区、热带地区、印度洋/西太平洋暖池区、热带东太平洋、北太平洋、北大西洋、美国和中国。

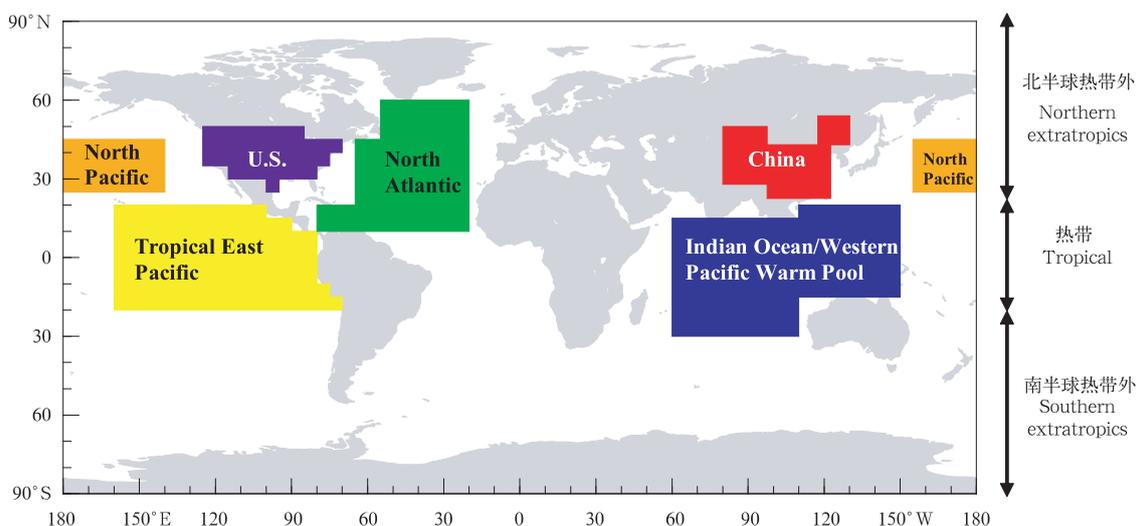


图 7 用于图 8 中区域平均温度演变分析的地理区域的划分

(各区域占全球面积的比例:北半球热带外:32.9%,南半球热带外:32.9%,热带:34.2%,印度洋/西太平洋暖池区:8.6%,热带东太平洋:7.4%,北太平洋:2.6%,北大西洋:5.5%,美国:1.7%,中国:1.6%)

Fig. 7 Map showing the regions used to create various regions-averaged time series for the case studies in Fig. 8 (The percent of the global area covered by each regions: the northern extratropics: 32.9%, the southern extratropics: 32.9%, the tropics: 34.2%, the Indian Ocean/western Pacific warm pool: 8.6%, the tropical eastern Pacific: 7.4%, the North Pacific: 2.6%, the North Atlantic: 5.5%, the U. S. : 1.7%, and China: 1.6%)

模拟和观测的这 9 个地区的区域平均气温变化如图 8 所示,各序列均进行了 10 a 的低通滤波。模式模拟的北半球热带外地区气温变化速度和观测较为一致(图 8a),包括 1910—1940 年的增温、1940—

1970 年的微弱降温和 1970 年以后的增温,这个时段内两个序列的相关系数为 0.84,通过了 5%显著性检验,但在 1960 年以前模拟气温较观测明显偏弱。对于南半球热带外地区(图 8b),观测资料显

示,20 世纪地表气温的演变过程为:1910—1940 年气温升高、1940—1970 年微弱降低、以及 1970 年以后气温升高,模拟结果不能再现 1910—1940 年的相对冷期而使得气温变化呈单一的弱增温趋势。模式

能够较好地再现全球热带地区的气温变化(图 8c),模拟与观测的相关系数达到 0.89,通过了 5% 显著性检验,温度振荡幅度与全球平均较为一致。

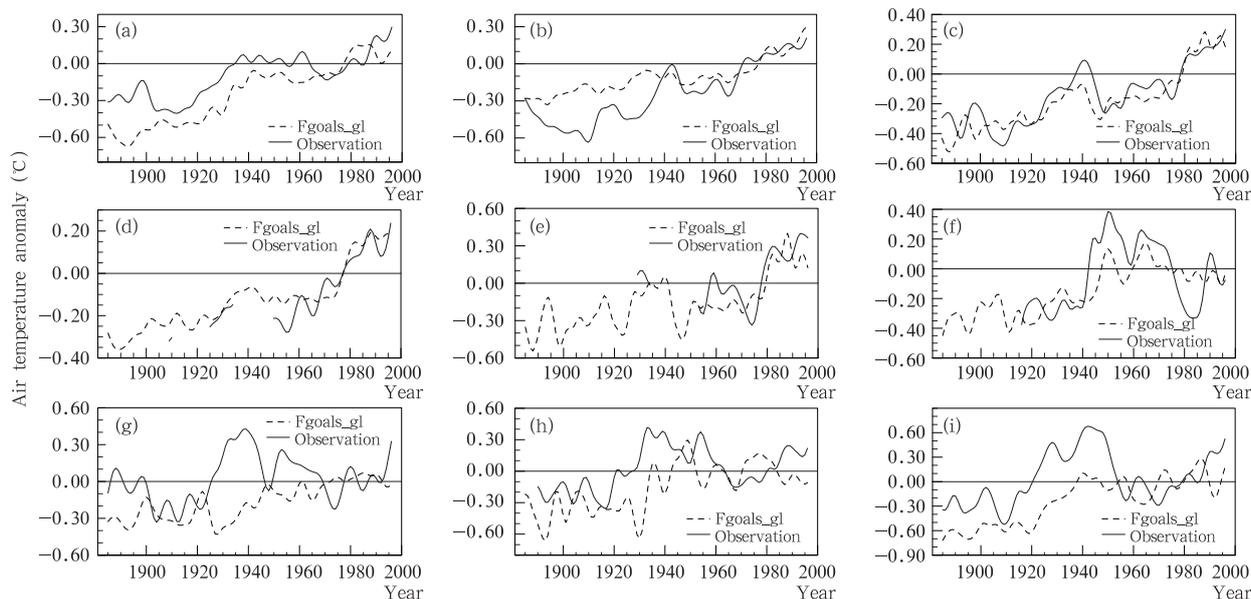


图 8 观测和模拟的区域平均地表气温距平随时间的演变

(相对于 1961—1990 年平均值),每幅图通过 10 a 的低通滤波 (a. 北半球热带外地区(20°—90°N), b. 南半球热带外地区(20°—90°S), c. 热带地区(20°N—20°S), d. 印度洋/西太平洋暖池区, e. 热带东太平洋, f. 北太平洋, g. 北大西洋, h. 美国, i. 中国)

Fig. 8 Low-pass filtered region-averaged time series of surface temperature anomalies (°C) relative to 1961—1990 from the observations and the model outputs for various regions; (a) the northern extratropics (20°—90°N), (b) the southern extratropics (20°—90°S), (c) the tropics (20°N—20°S), (d) the Indian Ocean/western Pacific warm pool, (e) the tropical eastern Pacific, (f) the North Pacific, (g) the North Atlantic, (h) the U. S., and (i) China

对于印度洋/西太平洋暖池区(图 8d),观测资料在 1950 年以前缺测较多,1950 年以后呈单一的增温趋势。关于这种增温趋势对东亚气候、全球季风降水的影响问题,此前已经有许多模拟研究(Zhou, et al, 2008b, 2009; Li, et al, 2008, 赵珊珊等, 2009)。模拟的气温变化表现为 1910—1940 年气温上升,1940—1970 年增温平缓,1970 年以后气温迅速增加,1970 年以后的增速与观测一致。因此,与全球变暖一致,过去 50 年印度洋亦发生显著的增温。

对热带东太平洋而言(图 8e),观测资料表现为 1950—1970 年气温下降,1970 年以后气温升高。模拟结果中,1950—1970 年气温变化平缓,1970 年以

后增温速度与观测一致,模拟与观测的相关系数达到 0.78,通过了 5% 显著性检验。模式中 1950 年以前气温变化的年代际特征显著,这可能是由于该地区受厄尔尼诺以及太平洋年代际振荡的影响,使得模拟序列的大气内部噪音与外强迫信号的比值增大(Knutson, et al, 2005)。

对于北太平洋地区(图 8f),观测资料显示该地区气温变化的年代际特征明显,其中最为显著的是发生在 20 世纪 40 年代的年代际变暖和 70 年代的年代际变冷现象。围绕着其机制目前尚有争论(杨修群等,2004)。模拟的气温变化的年代际特征与观测一致,尽管幅度比观测偏小,这是否意味着外强迫(包括自然和人为因子)是引起北太平洋年代际变化

的原因,是一个值得关注的话题。

观测中北大西洋气温变化表现出显著的年代际变化特征(图 8g),包括 1910—1940 年气温上升,1940—1970 年气温下降、以及 1970 年以后的升温。模拟与观测的北大西洋气温变化差别较大,两个序列间的相关系数仅为 0.04,意味着北大西洋的气温变化可能在很大程度上是气候系统自然振荡的结果(周天军,2003;周天军等,2005b),而与外强迫的联系不像其他地区那样明显。

对于美国地区(图 8h),观测资料表现为 1915—1935 年气温上升、1935—1965 年气温下降、1965 年以后气温升高。模拟的气温变化趋势与观测较为一致,两个序列间的相关系数为 0.41,通过了 5%显著性检验。模式中该地区气温变化的年代际特征比观测偏强。GFDL CM2 的模拟结果显示美国东南部地区气温变化的年代际特征较观测偏强,并指出其原因可能在于该地区受气候系统内部变率的影响较大;但模拟的美国中西部地区的气温变化与观测较为一致(Knutson, et al, 2005)。

对中国地区而言(图 8i),观测资料表现为 1910—1940 年偏暖,1940—1970 年偏冷、以及 1970 年以后的变暖,注意 20 世纪 40 年代以前的升温速度与 20 世纪后期相当。值得注意的是,20 世纪上半叶除了全球普遍存在的 20 世纪 40 年代的暖期之外,中国在 20 世纪 20 年代还存在一个暖期。模拟的气温变化速度与观测基本一致,1950 年以前的升温速度小于观测。模拟和观测序列间的相关系数为 0.57,通过了 5%显著性检验,该结果与 IPCC AR4 的多模式集合结果相近(Zhou, et al, 2006);鉴于本文的模拟试验只有一个成员、未进行集合模拟,接近 IPCC AR4 多模式集合结果的模拟技巧,从另外一个角度证实了该模式的模拟能力。此外,对于观测中中国区域 20 世纪 20 年代的变暖,在模式中没有得到再现,此前利用大气模式和耦合模式开展的研究,亦表示模拟不出这一暖期(Zhou, et al, 2006),如何解释 20 世纪早期的这一变暖现象依然是一个悬而未决的问题。

4 结论和讨论

本文利用 LASG/IAP 全球“海-陆-气-冰”耦合的气候系统模式 FGOALS_g1,模拟了 20 世纪气候,通过与观测结果进行比较,分析了 FGOALS_g1

的模拟能力,讨论了 20 世纪气温变化的机理,主要结论如下:

(1) 在自然因素和人为因素的共同强迫作用下,FGOALS_g1 能够较好地再现 20 世纪全球平均地表气温的演变过程,如 1910—1940 年的变暖、1940—1970 年的微弱变冷和 1970 年以后的变暖,相关系数达到 0.76。耦合模式对暖期的模拟技巧要高于冷期。分析表明,外强迫对过去 100 年全球平均气温变化的作用主要是再现其升温趋势和年代际变化,而对年际变率的作用不显著。

(2) 纬向平均地表气温距平随时间的演变表明,20 世纪发生了两次变暖:第 1 次发生在 1910—1940 年,第 2 次发生在 1980 年以后,变暖区域几乎覆盖全球。模拟结果与观测资料基本一致,但变暖的范围和速度都比观测偏小。

(3) FGOALS_g1 能够合理再现 20 世纪后期以及整个 20 世纪全球地表温度变化趋势的空间分布,但模拟的大部分地区的升温速度较观测偏弱。季节演变的结果表明北半球中高纬度地区冬、春季节的增温趋势大于夏、秋季节,而耦合模式却难以再现上述季节差异。

(4) 区域气温演变的结果表明,除北大西洋外,模式对其他地区具有较高的模拟技巧,表明外强迫是造成多数地区气温变化的主要原因,而北大西洋的气温变化可能在很大程度上是气候系统自然振荡的结果。

FGOALS_g1 耦合模式可以较为成功地模拟出 20 世纪气温的变化特征,尽管从时间演变序列,气温的空间分布的角度看,模拟的变暖速度均比观测偏小。大气模式分量 GAMIL 自身的偏差可能是导致耦合模式对气温升高模拟不足的一个重要原因,改进大气模式 GAMIL 模拟的气温场,有助于减少耦合模式的系统性偏差,提高整个耦合系统的模拟性能。另外,FGOALS_g1 对温室气体的响应敏感度偏低可能是造成模式模拟气温偏弱的另一个重要原因。但总体而言,FGOALS_g1 对 20 世纪气温变化的模拟效果较为理想,特别是在全球、半球和大陆尺度上。对过去 100 年气温变化的成功模拟,为未来利用该模式进行千年气候模拟奠定了基础。

参考文献

况雪源,刘健,王红丽等. 2009. 近千年中国区域降水模拟与重建

- 资料的对比分析. 地球科学进展, 24(2): 159-171
- 李立娟, 王斌, 周天军. 2007. 外强迫因子对 20 世纪全球变暖的综合影响. 科学通报, 52(15): 1820-1825
- 刘健, Hans von Storch, 陈星等. 2005. 近千年全球气候变化的长积分模拟试验. 地球科学进展, 20(5): 561-567
- 石广玉. 2007. 大气辐射学. 北京: 科学出版社, 271-275
- 王绍武, 谢志辉, 蔡静宁等. 2002. 近千年全球平均气温变化的研究. 自然科学进展, 12(11): 1145-1149
- 杨修群, 朱益民, 谢倩等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展. 大气科学, 28(6): 979-992
- 赵珊珊, 周天军, 杨修群等. 2009. 热带印度洋偶极子与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化. 气象学报, 67(4): 549-560
- 周天军. 2003. 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, 61(2): 164-179
- 周天军, 王在志, 宇如聪等. 2005a. 基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式. 气象学报, 63(5): 702-715
- 周天军, Helge D. 2005b. 卑尔根气候模式中大西洋热盐环流年代际与年际变率的气候影响. 大气科学, 29(2): 167-177
- 周天军, 满文敏, 张洁. 2009. 过去千年气候变化的数值模拟研究进展. 地球科学进展, 24(5): 469-476
- Bauer E, Claussen M. 2006. Analyzing seasonal temperature trends in forced climate simulations of the past millennium. Geophys Res Lett, 33: L02702, doi:10.1029/2005GL024593
- Bonan G B, Oleson K W, Vertenstein M, et al. 2002. The land surface climatology of the Community Land Model coupled to the NCAR Community Climate Model. J Climate, 15: 3123-3149
- Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. 2004. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model: Version Three. NCAR Tech. Note NCARTN-463 + STR, 70pp
- Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. J Geophys Res, 111: D12106
- Collins W D, Hack J J, Boville B A, et al. 2003. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM2). National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 171pp
- Dai A G, Wigley T M L, Boville B A, et al. 2001. Climates of the 20th and 21st centuries simulated by the NCAR climate system model. J Climate, 14: 485-519
- Delworth T L, Knutson T R. 2000. Simulation of early 20th century global warming. Science, 287: 2246-2250
- Gonzalez-Rouco J F, Zorita E, Cubasch U, et al. 2003. Simulating the climate since 1000 AD with the AOGCM ECHO-G//Wilson A. Solar variability as an input to the Earth's environment. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23-28 June 2003, Tatranska Lomnica, Slovak Republic. Noordwijk: ESA Publications Division, 329-338
- Graf H-F, Kirchner I, Robock A, et al. 1993. Pinatubo eruption winter climate effects: Model versus observations. Clim Dyn, 9: 81-93
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis//Solomon S D, Qin M, Manning Z, et al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. 1999. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean generation circulation model. Adv Atmos Sci, 16: 197-215
- Jones C, Gregory J, Thorpe R, et al. 2005. Systematic optimization and climate simulations of FAMOUS, a fast version of HadCM3. Clim Dyn, 25: 189-204
- Knutson T R, Delworth T L, Dixon K W, et al. 2005. Assessment of twentieth-century regional surface temperature trends using the GFDL CM2 coupled models. J Climate, 19: 1624-1651
- Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. 2008. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950-2000. Clim Dyn, doi: 10.1007/s00382-008-0482-7
- Li L J, Wang B, Wang Y Q, et al. 2007. Improvements in climate simulation with modifications to the Tiedtke convective parameterization in the grid-point atmospheric model of IAP LASG (GAMIL). Adv Atmos Sci, 24: 323-335
- Li Z X, Conil S. 2003. A 1000-year simulation with the IPSL ocean-atmosphere coupled model. Annals Geophys, 46: 39-46
- Liu H L, Zhang X H, Li W, et al. 2004. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluations. Adv Atmos Sci, 21: 675-690
- Ma X Y, Guo Y F, Shi G Y, et al. 2004. Numerical simulation of global temperature change over the 20th century with IAP/LASG GOALS model. Adv Atmos Sci, 21: 234-242
- Manabe S, Stouffer R J. 1996. Low-frequency variability of surface air temperature in a 1000-year integration of a coupled atmosphere-ocean-land surface model. J Climate, 9: 376-393
- Meehl G A, Ammann C, Arblaster J M, et al. 2004. Combination of natural and anthropogenic forcings and 20th century climate. J Climate, 17: 3721-3727
- Rind D, Balachandran N K, Suozzo R. 1992. Climate change and the middle atmosphere, II: The impact of volcanic aerosols. J Climate, 5: 189-208
- Santer B D, Taylor K E, Wigley T M L, et al. 1996. Human effect on global climate? Nature, 384: 522-524
- Shindell D T, Schmidt D A, Miller R L, et al. 2001. Northern hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone, solar, and the volcanic forcing. J Geophys Res, 106(D7): 7193-7210
- Stott P A, Tett S F B, Jones G S, et al. 2000. External control of twentieth century temperature variations by natural and anthropogenic forcings. Science, 15: 2133-2137
- Stouffer R J, Manabe S, Vinnikov K Y. 1994. Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. Nature, 367: 634-636

- Tett S F B, Stott P A, Allen M A, et al. 1999. Causes of twentieth century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 399: 569-572
- Wang B, Wan H, Ji Z Z, et al. 2004. Design of a new dynamical-core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Sci China (Ser. A)*, 47: 4-21
- Wen X Y, Zhou T J, Wang S W, et al. 2007. Performance of a reconfigured atmospheric general circulation model at low resolution. *Adv Atmos Sci*, 24: 712-728
- Xu Y, Peng Y B. 2007. Simulation of climate changes over the past 1000 years. Presentation at the 9th East Asian climate workshop, 2007/12, Fukuoka, Japan
- Yu Y, Zhi H, Wang B, et al. 2008. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and beyond. *Adv Atmos Sci*, 25 (4): 641-654
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth century surface air temperature over china and the globe simulated by coupled climate models. *J Climate*, 19(22): 5843-5858
- Zhou T J, Yu Y Q, Liu H L, et al. 2007. Progress in the development and application of climate ocean models and ocean-atmosphere coupled models in China. *Adv Atmos Sci*, 24(6): 729-738
- Zhou T J, Wu B, Wen X Y, et al. 2008a. A fast version of LASG/IAP climate system model and its 1000-year control integration. *Adv Atmos Sci*, 25(4): 655-672
- Zhou Tianjun, Yu R, Li H, et al. 2008b. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half century. *J Climate*, 21(15): 3833-3852
- Zhou T, Yu R, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. *J Climate*, 22: 2199-2215
- Zorita E, von Storch H, Gonzalez-Rouco F J, et al. 2003. Simulation of the climate of the last five centuries. GKSS Report 2003/12. GKSS Research Centre, Geesthacht, Germany
- von Storch J-S, Kharin V V, Cubasch U, et al. 1997. A description of a 1260-year control integration with the coupled ECHAM1/LSG general circulation model. *J Climate*, 10: 1525-1543