

大气季节内振荡的数值模拟 II. 全球变暖的影响

俞永强¹ 蒋国荣^{1, 2} 何金海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, 北京 100029

2 南京信息工程大学气象学院大气科学系, 南京 210044

摘 要 利用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) 发展的耦合气候模式 FGOALS1.0_g 控制试验、二氧化碳 (CO₂) 浓度加倍试验模拟结果及实测结果 (NCEP/NCAR 逐日再分析资料) 研究了全球变暖对大气季节内振荡 (ISO) 特征变化的影响。通过对比分析控制试验、二氧化碳浓度加倍试验模拟结果及观测结果发现: (1) FGOALS1.0_g 耦合气候模式具有一定的模拟季节内振荡的能力, 主要表现为模式能够模拟出 ISO 活跃区的位置、中心位置的季节变动以及强度的季节变化, 其缺陷是模拟的 ISO 强度偏弱, 模拟的 ISO 周期不显著且偏高频; (2) 实测资料诊断分析得到的近六十年来偏暖阶段 ISO 活跃区强度增强及范围扩大可能不是人类活动影响使温室气体增加所导致的, 它可能是大气 ISO 本身的年代际尺度变化; (3) 近六十年来纬向东传波 (西传波) 的能量的存在增长 (减少) 趋势的主要原因可能是人类活动影响引起温室气体增加所导致的; (4) 由于 FGOALS1.0_g 耦合气候模式在模拟 ISO 主周期及强度方面时存在不足, 因此实测结果诊断分析得到的偏暖阶段 ISO 小波能量强, 主周期范围大, 偏冷阶段反之的结论用 FGOALS1.0_g 耦合气候模式尚难以证实。

关键词 季节内振荡 人类活动影响 全球变暖 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2007) 04-0577-09

中图分类号 P433

文献标识码 A

Numerical Simulation of the Intraseasonal Oscillation Part II: Impact of Global Warming

YU Yong-Qiang¹, JIANG Guo-Rong^{1, 2}, and HE Jin-Hai²

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 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044*

Abstract The chief goal of this article is to explore some changes in tropical atmospheric interseasonal oscillation (ISO) under the background of global climate warming. Because the greenhouse gases (CO₂ is devoting maximum) increase results in climate warming during the 20th century, the impact of global warming on the ISO is explored by means of the numerical modeling by a coupled GCM—FGOALS1.0_g, which is developed in the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP). The article is divided into two parts: the first part is to investigate the changes in tropical atmosphere intraseasonal oscillation feature simulated by the coupled GCM without anthropogenic forcing (e. g. natural variability), the second part is to investigate the changes in tropical atmosphere intraseasonal oscillation feature under the global warming background induced by CO₂ increase (e. g. anthropogenic impact).

收稿日期 2005-12-19 收到, 2006-05-22 收到修改稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675049、40221503、90211011, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB4036005, 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式的研发和应用”

作者简介 俞永强, 男, 1968 年出生, 博士, 研究员, 主要从事耦合模式发展和海气相互作用研究。E-mail: yyq@lasg.iap.ac.cn

Based on the control experiment, CO₂ doubling experiment with coupled climate system model FGOALS1.0_g and NCEP/NCAR reanalysis data, the influence of anthropogenic activities on fundamental feature of the atmosphere intraseasonal oscillation as well as its interannual and interdecadal variation is investigated. By means of comparison between model and observation, it is found that (1) the coupled climate system model FGOALS1.0_g shows ability to somewhat extent to simulate atmospheric intraseasonal oscillation, for example, the region where ISO is active in the global, the seasonal variation of center with the maximum ISO intensity and the seasonal cycle of ISO intensity. But the coupled model underestimates ISO intensity and the simulated ISO frequency is higher than the observed one; (2) the fact that the observed ISO intensity in the active region is strengthened and the extension of the active region is enlarged during the warming period may not result from CO₂ increase induced by human activities, it may be the interdecadal variation of atmosphere intraseasonal oscillation itself; (3) the increased (decreased) tendency of ratio of longitudinal eastward-propagation (westward-propagation) ISO energy may be attributed to CO₂ increase induced by human activity; (4) since FGOALS1.0_g shows deficiency in simulating the observed period and intensity of ISO, it is difficult to prove the observational diagnosis result that the tropical ISO wavelet energy is strengthened and ISO period range is increased during the warm period and opposite changes during the cold period with the coupled model FGOALS1.0_g.

Key words intraseasonal oscillation, numerical simulation, anthropogenic influence, interdecadal variation

1 引言

大气圈由于自然和人为因素的影响处于不断变化之中,其中全球大气成分的变化与人类活动密切相关,根据极地冰芯分析资料,18世纪以前的近40万年里,大气中的主要温室气体CO₂含量长期波动于 $190 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$ 左右。但从19世纪开始,CO₂含量持续增加,到1998年已达 360×10^{-6} ,比工业革命前增加了 60×10^{-6} 。根据夏威夷群岛冒纳罗亚山(Maunaloa)观测前记录,1958年大气CO₂含量为 315×10^{-6} ,1998年达到 360×10^{-6} ,因此,在40年时间里,CO₂含量增加了 45×10^{-6} ,平均每年增加的速率为 1×10^{-6} [1]。

温室气体的增加可能导致全球气候变暖,一些理论研究和模式模拟也证实了大气温室气体增加能引起全球平均地面气温升高[1]。这样就会提出一个问题:由于人类活动向大气排放温室气体所造成的气候增暖会对海洋和大气环流系统产生什么影响?

资料诊断分析研究发现[2~4],20世纪70年代中期气候系统出现了一次跃变(这与全球地面气温的再度增暖是对应的),导致ENSO事件演变、青藏高原热量源汇及夏季风活动均产生了大的变化。Kitoh等[5]利用一个全球耦合大气-海洋环流模式探讨了大气CO₂增加时亚洲夏季风的变化,发现印度洋夏季季风降水随着全球增暖显著增加了。Zwiers等[6]利用第二代加拿大气候模拟中心的大

气环流模式模拟了由于CO₂加倍,表面气候极值的变化,模拟结果分析发现,降水极值增加变化最大的地方是西北印度洋,它与该区域的夏季风增加相关联;热带和中纬度风极值的适度减小与CO₂加倍气候中径向温度梯度减少一致。还有其他一些工作利用全球耦合气候模式研究了人类活动对气候的影响[7~10]。这些研究均表明,人类活动所导致的气候增暖会对海洋和大气环流系统产生一些影响。

季节内振荡(Intraseasonal Oscillation,简称ISO)是热带大气在7~90天时间尺度的最强振荡信号[11~13],且有明显的区域分布特征[14]和季节变化[15,16],由于其时间尺度介于月、季之间,因而与长期天气变化和短期气候异常均有密切关联[17],一直受到气象学界的广泛重视。国内学者自20世纪80年代就开始了相关领域的研究工作[18~20],并取得了丰富的成果[17,20~25]。那么,近几十年来的气候增暖是否也会对大气季节内振荡产生什么影响?最近,董敏等[26]从资料诊断分析角度开展了一些相关研究,本文将从耦合气候模式进一步探讨相关问题。

在本文的第一部分[27],我们利用中国科学院大气物理研究所的FGOALS1.0_g耦合气候模式控制试验(不考虑温室气体的变化)模拟结果探讨了模拟的自然变率下热带季节内振荡的基本特征及年际以上时间尺度的变化,得到了一些有价值的结论。

作为论文的第二部分, 本文的主要目的是利用上述耦合气候模式模拟的 CO_2 增加试验 (CO_2 浓度从工业革命前的 280×10^{-6} 以 1% 等比增加到 560×10^{-6} , 二倍于工业革命前的 CO_2 浓度, 为方便起见以下简称加倍试验) 模拟结果来分析热带大气季节内振荡特征的变化, 并通过对比控制试验模拟分析结果以及实测分析结果来进一步探讨由于人类活动影响对热带大气季节内振荡特征的可能影响。

2 试验、资料与方法

本文所使用的耦合气候系统模式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) 最新发展的第四代耦合气候系统模式 FGOALS1.0_g (Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model, Version 1.0_g), 该耦合模式的主要特点已在文献[27]中作了介绍, 这里不再赘述。利用该耦合模式, Yu 等[28]完成了多个长期数值模拟试验, 其中包括工业革命前控制试验以及大气中二氧化碳浓度从工业革命前的 280×10^{-6} 以 1% 等比增加到 560×10^{-6} 的 CO_2 浓度增加试验 (加倍试验)。文献[27]已利用控制试验模拟结果分析了模拟的自然变率下的热带季节内振荡的基本特征及年际以上尺度的变化特征, 本文则利用加倍试验模拟结果, 同时对比控制试验和实测结果, 探讨人类活动对热带 ISO 的可能影响。

本文所用资料主要有二类: 一类资料是作为实测资料的 56 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 资料的时段为 1948~2003 年; 该类资料主要用于诊断分析。另一类资料就是利用上述耦合气候模式模拟的加倍试验和控制试验 60 年逐日模式结果资料, 包括高层 (200 hPa) 和低层 (200 hPa) 经、纬向风, 下垫面海表水温、降水等要素资料, 所取的 60 年时间段加倍试验与控制试验是对应的, 主要方便对比和分析。

本文使用的诊断方法同文献[27], 即 ISO 指标场方法、时空谱方法[29]、小波分析方法[30]等。

3 人类活动对热带大气季节内振荡特征的影响

根据 IPCC 最新的研究结果 (图略), 1856~2003 年这 148 年时间全球地面气温呈现出明显的

增加趋势, 共增加了大约 $0.4 \sim 0.8^\circ\text{C}$, 并且自 20 世纪 70 年代中后期以来的增暖趋势仍在继续。目前, 普遍认为最近半个世纪以来的全球增暖可能主要由人类活动向大气排放温室气体造成的^[1]。本文所采用的 FGOALS1.0_g 耦合气候模式加倍试验与控制试验对比结果 (图略) 显示, 在 60 个模式年里, CO_2 浓度以每年 1% 等比增加将使全球地面平均气温升高大约 0.9°C , 表明人类活动导致 CO_2 浓度持续增加进而促使全球气候变暖。那么, 人类活动影响会对热带大气季节内振荡特征产生什么影响呢?

3.1 CO_2 浓度增加对 ISO 强度及时空变化的影响

为描述全球大气 ISO 强度的时空变化, 在自然变率部分我们通过引进 ISO 指标场方法给出了模拟的自然变率下全球大气 ISO 强度在不同季节的空间分布 (图 1), 分析了 ISO 活跃区的位置及季节变动、季节变化等。得出模拟的自然变率下全球 ISO 主要活跃区与近六十年的实测结果基本接近; ISO 主要活跃区的季节变动特征与实际结果基本一致; 全球 ISO 强度冬强、夏弱的季节变化也与实际结果一致。

作为对比, 图 2 给出了利用 FGOALS1.0_g 耦合气候模式加倍试验 (考虑人类影响) 模拟结果资料分析得出的 200 hPa 速度势 ISO 强度在不同季节的空间分布图, 其中, 图中阴影区为 ISO 强度比值超过 0.42 的区域。由图 2 可以发现, 在空间分布上, 加倍试验模拟得到的 ISO 活跃区的位置也基本上位于印度洋与西太平洋, 与观测分析结果^[11] (也可参看论文的第一部分中的图 1) 基本上是对应的; 在活跃区中心位置的季节变动上, 加倍试验模拟的冬季主要活跃区的位置略偏南, 夏季略偏北的特征也很明显, 这与实测结果也是对应的; 在 ISO 强度的季节变化上, 冬春季强、夏秋季弱的季节变化特征也较为明显, 与实测结果一致。由于 CO_2 浓度增加的加倍试验与近六十年的实测结果有气候增暖这一相近状况, 因而比自然变率更具有可比性, 上述加倍试验模拟结果分析表明, FGOALS1.0_g 耦合气候模式具有一定的模拟季节内振荡的能力, 主要在 ISO 活跃区的主要区域、中心位置的季节变动以及强度的季节变化方面模拟较好。

但是, 与近六十年的实测分析结果 (文献[26]图 1) 对比, 可以发现, CO_2 浓度增加的加倍试验模拟的 ISO 活跃区的范围及强度都比实测结果小且

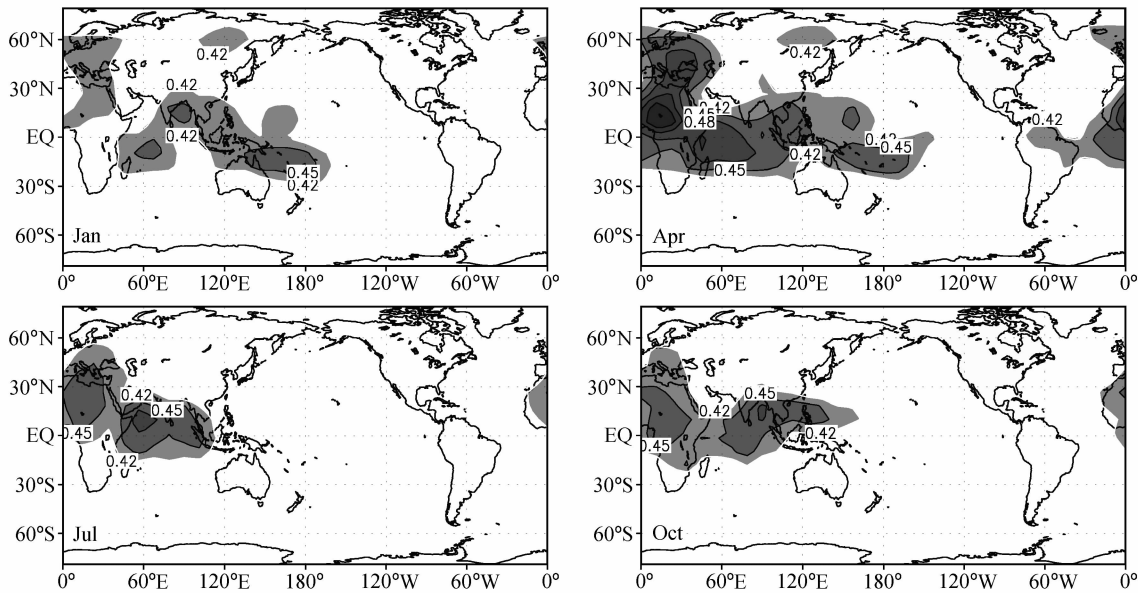


图 1 60 年耦合气候模式控制试验模拟结果分析得出的 200 hPa 速度势 ISO 强度指数(定义为季节内振荡方差与总方差的比值)在不同季节的空间分布图(58 年平均)。阴影为超过 0.42 的区域

Fig. 1 The spatial distributions of 200 hPa velocity potential ISO intensity index (ratio of variance of ISO to total variance) in different seasons (58 year mean) based on 60 year FGOALS1.0_g control test simulation. The shadow regions are the ones the intensity is above 0.42

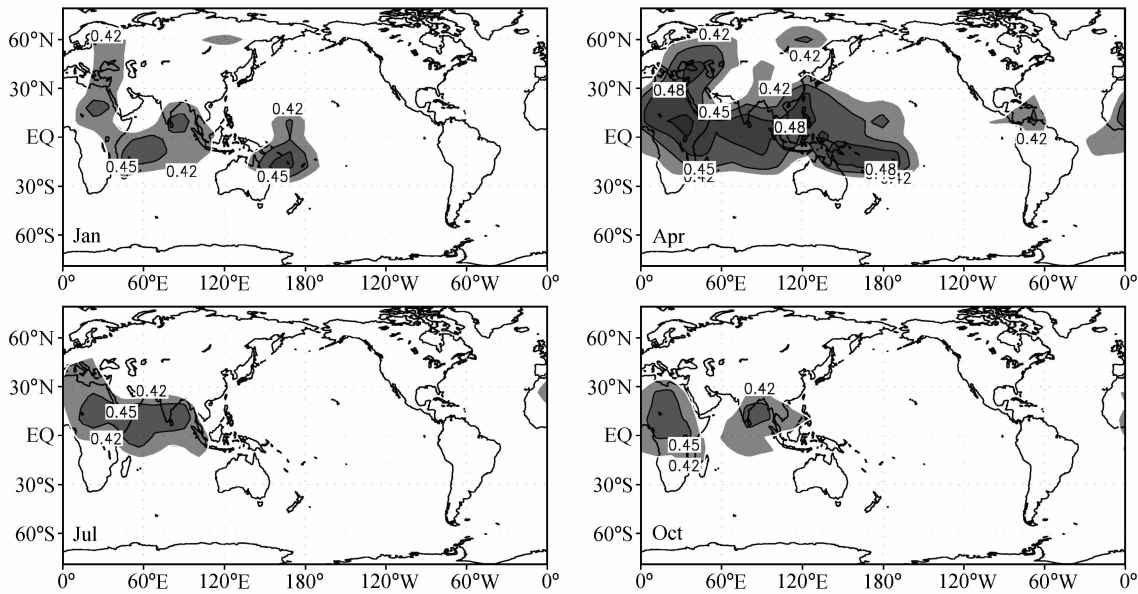


图 2 同图 1, 但为加倍试验

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for FGOALS1.0_g CO₂ doubling simulation

弱, 即 FGOALS1.0_g 耦合气候模式模拟的 ISO 活跃区在强度上是偏弱的, 这与自然变率下模拟的结果一致, 这一结果说明 FGOALS1.0_g 耦合气候模式模拟的 ISO 在强度上总体上是偏弱的, 它与 CO₂ 浓度是否增加无关。进一步对比图 1 与图 2, 即对

比模拟的自然变率状况与 CO₂ 浓度增加的状况, 可以看出, 除了一些小的差别外, 如 CO₂ 浓度增加状况下的 ISO 在春季比自然变率状况下的略强, 而 CO₂ 浓度增加状况下的 ISO 在秋季比自然变率状况下的要弱等, 总体而言二者的差异不是太大, 即

没有出现 CO₂ 浓度增加时 ISO 强度和范围有明显增强和扩大倾向。

在文献[26]，根据 1948~2003 年全球地面平均气温所划分的两个明显的阶段：1948~1976 的气温偏冷阶段与 1977~2003 年的气温偏暖阶段，我们分别给出了偏冷阶段(图 3)和偏暖阶段(图 4)不同季节多年平均全球大气 ISO 强度的空间分布图。通过图 3、4 的对比可以发现，偏暖阶段大气 ISO 无论是强度大小还是活跃区范围均比偏冷阶段大，但存在季节性差异，夏秋季十分明显，冬季不明显。上述实测分析的结果似乎表明，大气 ISO 强度与活跃区范围的大小与气候冷暖有关。

但图 2 和图 1 的对比显示，模拟的结果并没有得到从实测分析结果推测出的结论，即大气 ISO 强度和活跃区范围的大小与气候冷暖有关。数值模拟的结果显示，与自然变率状况相比，CO₂ 浓度增加时 ISO 强度和范围并没有明显增强和扩大倾向，因此，CO₂ 浓度增加导致的气候变暖可能不是导致 ISO 活跃区的 ISO 强度增强和范围扩大的原因。那么，实测情形偏冷与偏暖阶段二者在 ISO 活跃区的强度和范围的明显差别是什么造成的？

在文献[26]，我们研究了模拟的自然变率下，热带 ISO 强度有明显的年际与年代际变化，在高强度

指数阶段，全球 ISO 强度强，活跃区范围大；低强度指数阶段，全球 ISO 强度弱，活跃区范围小；并存在季节性差异，冬季这种变化不明显，春秋季节明显；上述在模拟的自然变率下全球 ISO 不同阶段的变化特征与近六十年实测结果趋势一致，这就是说，在不考虑人类活动引起的全球变暖影响的情况下，模拟的自然变率下全球 ISO 自身就存在这种年代际变化，可能与 CO₂ 浓度的持续增加导致的气候增暖无关，诊断得到的实测结果中偏暖阶段可能正好处在其高指数阶段，而偏冷阶段相反，温室气体的增加不是产生 ISO 主要活跃区的 ISO 强度增强和范围扩大的原因。

3.2 对热带大气 ISO 传播特征变化的影响

研究大气运动波谱特征、传播特征时，时空谱方法是一个较好的分析工具。在自然变率部分的研究中，我们利用时空谱方法研究了自然变率下热带 ISO 的传播特征的变化，发现纬向东传或西传 1~6 波之和和季节内振荡能量相对比值基本维持一种平衡状态，不存在上升或下降趋势。

图 5 是用 1948~2003 年共 56 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料分析得到的近六十年来赤道地区(10°S~10°N)纬向东传或西传 1~6 波之和和季节内振荡能量相对比值的年代际变化曲线，它代

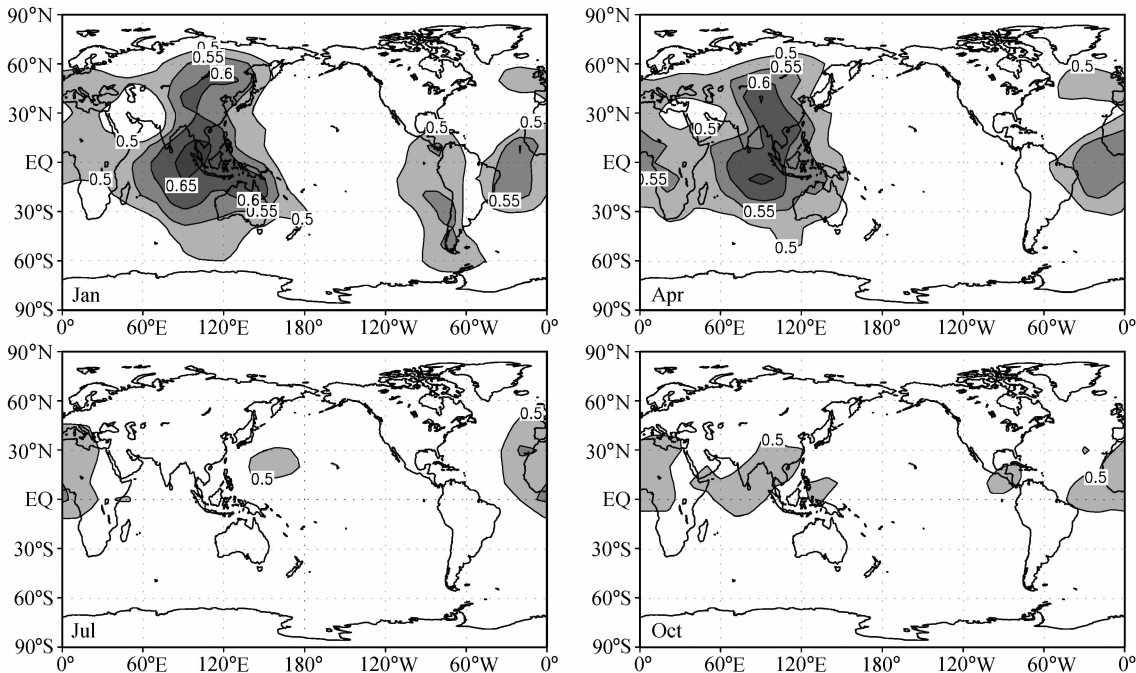


图 3 偏冷阶段 200 hPa 速度势 ISO 强度在不同季节的空间分布图。阴影为超过 0.55 的区域
Fig. 3 The spatial distributions of 200 hPa velocity potential ISO intensity in different seasons for cold phase based on 56 year NCEP/NCAR reanalysis data. The shadow regions are the ones the intensity is above 0.55

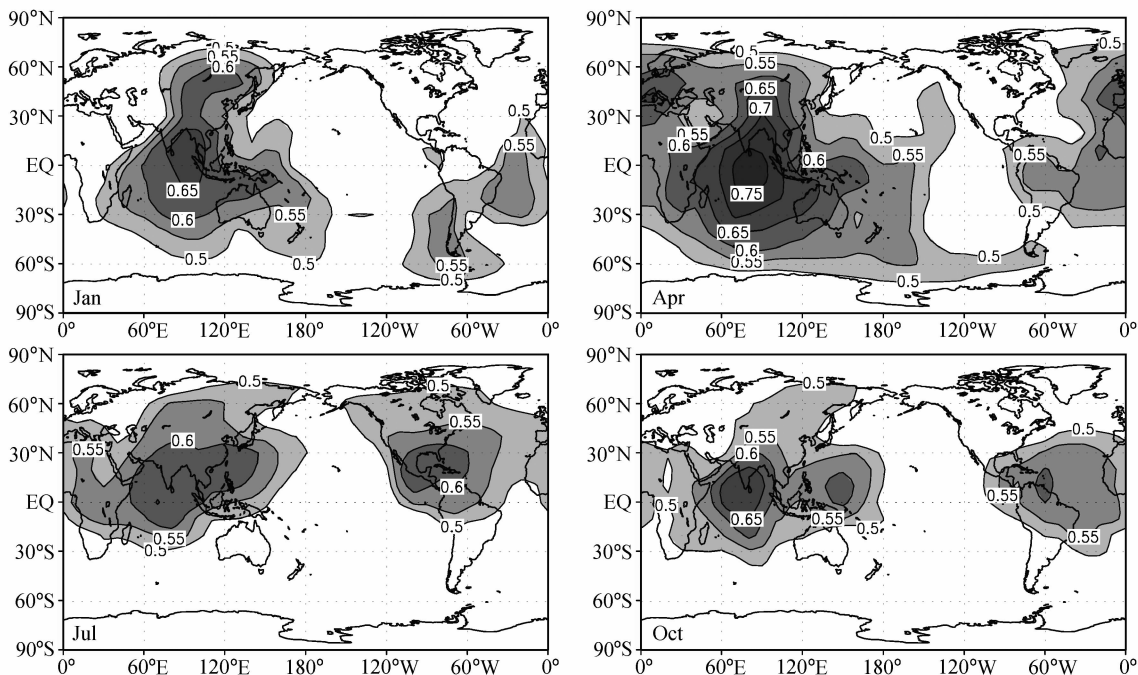


图 4 同图 3，但为暖阶段
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the warm phase

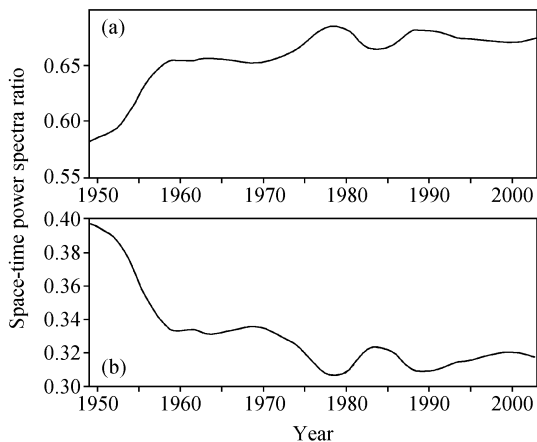


图 5 用 56 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料分析得到的赤道地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 大气 200 hPa 速度势东传(a)和西传(b)1~6 波 ISO 时空功率谱比值的年代际变化曲线
Fig. 5 The interdecadal curves of 200 hPa velocity potential ISO space-time power spectra ratio in the equatorial region ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) for eastward-propagating (a) and westward-propagating (b) wavenumbers 1 - 6 based on 56 year NCEP/NCAR reanalysis data

表了自然界真实大气的状况。图 5 中，由于时空谱计算中采用滑动窗口技术^[26]，分析资料缩短了 2 年，为 54 年。

首先，对比图 5a 和 5b，可以看出，东传波能量

量值高于西传波能量量值；其次，近六十年来，纬向东传的 1~6 波之和季节内振荡能量相对比值总体存在一个增长的趋势，而纬向西传的 1~6 波之和季节内振荡能量相对比值是一个下降趋势。图 1 显示，近六十年来气候仍在增暖。也就是说，对应着气候增暖，相对而言纬向东传的季节内振荡能量是增加的，而纬向西传的季节内振荡能量则是减少的。

自然变率下纬向东传的季节内振荡能量基本维持一种平衡状态，不存在上升或下降趋势。而实际的大气中，纬向东传的季节内振荡能量存在增长趋势，这种增长趋势是否与温室气体增加有关？

图 6 为用 FGOALS1.0_g 耦合气候模式加倍试验模拟的赤道地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 大气 200 hPa 速度势东传和西传 1~6 波 ISO 时空功率谱比值的年代际变化曲线，代表了人类活动影响下热带 ISO 主要的东传和西传波能量随时间的变化。

由图 6 可以看出，东传 1~6 波季节内振荡能量在总季节内振荡能量中所占比例高于 57%，比西传（低于 41%）明显高，这与实测资料（NCEP/NCAR 资料）分析的东传占优的结论一致，由于前 6 个波平均季节内振荡能量已占季节内振荡总能量的 97%（东传与西传之和），主要讨论前 6 个波以

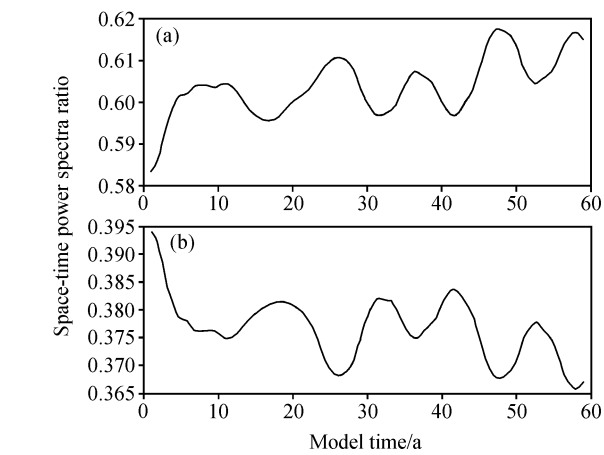


图 6 用 FGOALS1.0_g 耦合气候模式加倍试验模拟的赤道地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 大气 200 hPa 速度势东传 (a) 和西传 (b) 1~6 波 ISO 时空功率谱比值的年代际变化曲线

Fig. 6 The interdecadal curves of 200 hPa velocity potential ISO space-time power spectra ratio in the equatorial region ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) for eastward-propagating (a) and westward-propagating (b) wavenumbers 1 – 6 based on 60 year FGOALS1.0_g CO_2 double test simulation

代表整体东传、西传效应是合理的。由图 6 还可以发现，无论是东传波还是西传波，整体而言呈现出明显的规律性，即东传 1~6 波之和的季节内振荡能量相对比值存在明显的缓慢增长趋势，而西传 1~6 波之和的季节内振荡能量相对比值则存在明显的缓慢下降趋势。这也就是说，由于人类活动影响导致温室气体增加，也会使热带大气 ISO 传播特征发生变化。 CO_2 浓度的持续增加，东传波的季节内振荡能量相对增长，而西传波的季节内振荡能量相对减少。

因此，对比实测资料分析结果以及加倍试验与控制试验模拟资料分析结果，可以得出，对应实际大气中的气候变暖过程，热带大气 ISO 传播特征发生了一些变化，东传波的季节内振荡能量有增长趋势，而西传波的季节内振荡能量有减少趋势。而热带大气 ISO 传播特征的这一变化正是由于人类活动影响使温室气体增加（主要是 CO_2 ）所导致的。

3.3 对热带大气 ISO 周期特征变化的影响

我们在分析 FGOALS1.0_g 耦合气候模式模拟 ISO 周期的性能^[26]时发现，FGOALS1.0_g 耦合气候模式模拟的自然变率下的 ISO 周期不显著且趋于高频，而利用耦合气候模式加倍试验模拟结果分析得到的 ISO 周期也主要位于 15~50 天的

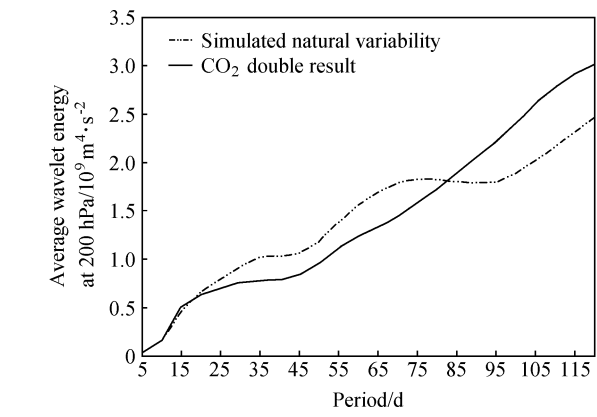


图 7 用耦合气候模式控制试验和加倍试验模拟结果分析得到的不同情形下小波能量相对于周期的分布

Fig. 7 The distributions of simulated wavelet energy against period in different states based on FGOALS1.0_g control test and CO_2 double test

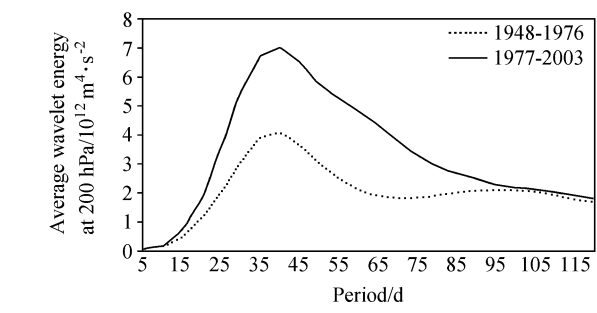


图 8 用 NCEP/NCAR 资料分析得到的不同时期小波能量相对于周期的分布

Fig. 8 The distributions of wavelet energy against period during different periods based on NCEP/NCAR reanalysis data

频段内。图 7 是分别用耦合气候模式控制试验模拟结果与加倍试验模拟结果分析得到模拟的自然变率与 CO_2 浓度增加情形下小波能量相对于周期的分布，图中结果显示，加倍试验与控制试验模拟结果相近，模式模拟的 ISO 周期不显著且趋于高频，加倍试验更为明显，ISO 周期不显著且趋于高频是目前大多数模式的共同特点^[25]，本文使用的耦合气候模式 FGOALS1.0_g 也同样存在这一缺陷。

图 8 是实测结果中偏冷（1948~1976 年）与偏暖（1977~2003 年）两个不同阶段小波能量相对于周期的分布，图中结果显示，偏暖阶段，ISO 周期段小波能量能量强（此结果与前面分析结果一致），ISO 主周期范围大；偏冷阶段反之。

由于 FGOALS1.0_g 耦合气候模式在模拟 ISO 主周期时本身就存在缺陷，因此，用上述模拟结果

推断 ISO 周期没有变化的结论尚不能肯定。

4 结论

本文利用中国科学院大气物理研究所 LASG 发展的 FGOALS1.0_g 耦合气候模式控制试验、加倍试验模拟结果和 NCEP/NCAR 资料研究了人类活动影响引起的全球变暖对热带大气季节内振荡特征的可能影响。研究得到以下主要结论:

(1) FGOALS1.0_g 耦合气候模式具有一定的模拟季节内振荡的能力,主要表现在 ISO 活跃区的主要区域、中心位置的季节变动以及强度的季节变化方面模拟较好,其缺陷是模拟的 ISO 强度偏弱,模拟的 ISO 周期不显著且偏高频。

(2) 利用 NCEP/NCAR 资料诊断分析得到的偏暖阶段 ISO 主要活跃区的 ISO 强度增强和范围扩大,偏冷阶段反之的结论,可能是大气 ISO 系统自身的年代际尺度变化,与人类活动影响导致温室气体增加所引起的全球气候变暖没有关联。

(3) 自然变率下纬向东传波(西传波)的能量基本维持一种平衡状态,没有上升或下降趋势;人类活动影响下的纬向东传波(西传波)的能量则呈现出缓慢增长(减少)趋势。利用这两个试验的结果以及用 NCEP/NCAR 资料诊断分析得到的近六十年来纬向东传波(西传波)的能量的存在增长(减少)趋势的结果可以推断,人类活动影响了热带大气季节内振荡的东传波(西传波)的能量变化。

(4) 由于 FGOALS1.0_g 耦合气候模式在模拟 ISO 主周期及强度方面时存在缺陷,用实测结果诊断分析得到的偏暖阶段 ISO 周期段小波能量强、主周期范围大,偏冷阶段反之的结论,用 FGOALS1.0_g 耦合气候模式尚难以证实,应在不断改进模式的基础上进一步研究相关问题。

致谢 感谢两位匿名审稿人对本文的评审意见。感谢李薇博士和董敏研究员与作者有益的讨论。本文的数值计算工作是中国科学院超级计算中心的高性能计算机联想 6800 和中国科学院大气物理研究所科学计算和信息中心的计算机 IBM SP690 完成的。

参考文献 (References)

[1] 张兰生,方修琦,任国玉. 全球变化. 北京: 高等教育出版社, 2000
Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu. *Global Change* (in

Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000
[2] Wang Bin. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J. Climate*, 1995, **8** (2): 267~285
[3] 赵平, 陈隆勋. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系. 中国科学, 2001, **31** (4): 327~332
Zhao Ping, Chen Longxun. The climate characteristics of the atmospheric heat source over the Qinghai - Tibetan Plateau for the period of 1961 - 1995 and their relation with China rainfall. *Science in China* (Series D), 2001, **31** (4): 327~332
[4] 何金海, 李峰. 东亚夏季风与太平洋 SSTA 关系的年代际变化及其机制研究. ENSO 循环机理和预测研究. 北京: 气象出版社, 2003. 16~27
He Jinhai, Li Feng. The interdecadal change of the relation between East Asian summer monsoon and SSTA in Pacific and their mechanism research. *The Research on ENSO Cycle Mechanism and Foreshadow* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 16~27
[5] Akio K, Yukimoto S, Noda A, et al. Simulated changes in the Asian summer monsoon at times of increased atmospheric CO₂. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1997, **75** (6): 1019~1031
[6] Francis W Z, Kharin V V. Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling. *J. Climate*, 1998, **11** (9): 2200~2222
[7] Gerald A M, Washington W M, Arblaster J M, et al. Anthropogenic forcing and decadal climate variability in sensitivity experiments of twentieth- and twenty-first-century climate. *J. Climate*, 2000, **13** (11): 3728~3744
[8] 陈起英, 俞永强, 郭裕福, 等. 温室效应引起的东亚区域气候变化. 气候与环境研究, 1996, **1**: 113~123
Chen Qiyong, Yu Yongqiang, Guo Yufu, et al. Climatic change in East Asia induced by greenhouse effect. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1996, **1**: 113~123
[9] Guo Yufu, Yu Yongqiang, Liu Xiyong, et al. Simulation of climate change induced by CO₂ increasing for East Asia with IAP/LASG GOALS model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 53~66
[10] Ma Xiaoyan, Guo Yufu, Shi Guangyu, et al. Numerical simulation of global temperature change over the 20th century with IAP/LASG GOALS model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 234~242
[11] Madden R A, Julian P. Description of a 40 - 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 702~708
[12] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40 - 50 day period. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **29**: 1109~1123
[13] Slingo J M, Rowell D P, Sperber K R. On the predictability of interannual behavior of the Madden-Julian oscillation and its relationship with El Niño. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**: 583~609

- [14] Salby M L, Hendon H H. Intraseasonal behavior of clouds, temperature and motion in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51** (15): 2207~2225
- [15] Madden R A. Seasonal variations of the 40 - 50 day oscillation in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43** (24): 3138~3135
- [16] Madden R A, Julian P R. Observations of the 40 - 50 day tropical oscillation—A review. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**: 814~837
- [17] 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1993
Li Chongyin. *Low-Frequency Oscillation in the Atmosphere* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993
- [18] 何金海, Murakami T, Nakazawa T. 1979 年夏季 40~50 天周期振荡的空间结构及其位相传播. 南京气象学院学报, 1985, **1**: 56~66
He Jinhai, Murakami T, Nakazawa T. The spatial structure of 40 - 50 day oscillations and their phase propagation during the summer of 1979. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1985, **1**: 56~66
- [19] 何金海, Murakami T, Nakazawa T. 1979 年夏季亚洲季风区域 40~50 天周期振荡的环流及其水汽输送场的变化. 南京气象学院学报, 1985, **2**: 163~175
He Jinhai, Murakami T, Nakazawa T. Circulation with 40 - 50 day oscillation and changes in moisture transport over monsoon Asia in 1979 summer. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1985, **2**: 163~175
- [20] Li Chongyin. Actions of summer monsoon trough (ridges) and tropical cyclone over South Asia and moving CISK mode. *Scientia Sinica* (B), 1985, **28** (11): 1197~1206
- [21] Chen Longxun, Xie An. Westward propagation low-frequency oscillation and its teleconnection in eastern hemisphere. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, **2** (3): 300~312
- [22] Li Chongyin, Wu Peili. An observational study of 30 - 50 day atmospheric oscillations. Part I: Structure and propagation. *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7** (3): 294~304
- [23] 巢纪平, 林永辉, 王斌. 海表温度异常对 Madden-Julian 振荡的影响. 气象学报, 1996, **54** (3): 258~271
Cao Jiping, Lin Yonghui, Wang Bin. The influence of sea surface temperature anomaly on Madden-Julian oscillation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54** (3): 258~271
- [24] 李薇, 俞永强. 大气季节内振荡的耦合模式数值模拟. 大气科学, 2001, **25** (1): 118~131
Li Wei, Yu Yongqiang. Intraseasonal oscillation in a coupled general circulation model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (1): 118~131
- [25] 琚建华, 钱诚, 曹杰. 东亚夏季风的季节内振荡研究. 大气科学, 2005, **29** (2): 187~194
Ju Jianhua, Qian Cheng, Cao Jie. The intraseasonal oscillation of East Asian monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 187~194
- [26] 董敏, 张兴强, 何金海. 热带季节内振荡时空特征的诊断研究. 气象学报, 2004, **62** (6): 821~830
Dong Min, Zhang Xingqiang, He Jinhai. A diagnostic study on the temporal and spatial characteristics of the tropical intraseasonal oscillation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 821~830
- [27] 蒋国荣, 俞永强, 何金海. 季节内振荡的数值模拟 I. 模拟的自然变率. 大气科学, 2007, **31** (3): 536~546
Jiang Guorong, Yu Yongqiang, He Jinhai. Numerical simulation of the intraseasonal oscillation. Part I: Simulative natural variability. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (3): 536~546
- [28] Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. A flexible global coupled climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 169~190
- [29] 陈兴跃, 王会军, 曾庆存. 大气季节内振荡及其年际变化. 北京: 气象出版社, 2000
Chen Xingyue, Wang Huijun, Zeng Qingcun. *Atmosphere Intraseasonal Oscillation and Its Interannual Variation* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000
- [30] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究. 北京: 气象出版社, 1999
Lin Zhenshan, Deng Ziwan. *The Research on Wavelet Climate Diagnostic Technology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999