季节内振荡的数值模拟 I. 模拟的自然变率

蒋国荣^{1,2} 俞永强¹ 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)发展的耦合气候系统模式FGOALS 1.0_g 控制试验(二氧化碳浓度保持工业革命前的浓度不变,代表无人类活动影响的自然变率)模拟结果,研究了模拟的自然变率下热带季节内振荡(Intraseasonal Oscillation,简称 ISO)的基本特征与年际、年代际变化。研究发现,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;但模拟的 ISO 强度偏弱与 ISO 周期不明显。进一步利用控制试验模拟结果研究了模拟的自然变率下热带 ISO 特征的年际与年代际变化,得出:第一,模拟的自然变率下的热带 ISO 强度存在明显的年际与年代际变化,低强度指数阶段,全球 ISO 强度减弱,活跃区范围缩小,高强度指数阶段则相反;并存在季节性差异,冬季不明显,春秋季明显,实测结果有类似结论,但高、低指数似乎与增暖有关。第二,模拟的自然变率下的热带东传或西传 ISO 能量比值总体来看基本上维持一种平衡状态,不存在上升或下降趋势;与实际状况下的东传相对能量增强、西传相对能量减弱趋势明显不同。

关键词 季节内振荡 自然变率 数值模拟 年代际变化
 文章编号 1006 - 9895 (2007) 03 - 0536 - 11
 中图分类号 P433
 文献标识码 A

Numerical Simulation of the Intraseasonal Oscillation Part I: Simulative Natural Variability

JIANG Guo-Rong^{1, 2}, YU Yong-Qiang¹, 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 Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The chief goal of this article is to explore some changes in the tropical atmospheric interseasonal oscillation (ISO) under the background of global climate warming. Because that the greenhouse gas (CO₂ is devoting maximum) increase is the cause of climate warming during 20th century, the global warming's impact on the ISO is explored using the coupled GCM—FGOALS 1. 0_g modeling, 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 the tropical atmosphere ISO feature simulated by the coupled GCM without anthropogenic forcing (e. g. simulative natural variability), the second part is to investigate the changes in the tropical atmosphere ISO 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 40231004、40221503、90211011,国家重点基础研究计划 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 蒋国荣, 男, 1963年出生, 博士, 教授, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: jgr4417610@jsmail. com. cn

Based on the coupled climate system model FGOALS 1.0 g control test (the CO₂ density maintains no change as the quantity before industrial revolution) simulation result, the interannual and interdecadal variations and the fundamental feature of the tropical ISO under the state of simulated natural variability are studied. It is found that the global ISO chief active region is close to the observation result in the last 56 years, all being situated in the tropical Indian Ocean and the western Pacific Ocean; and the seasonal variation of central place of global ISO chief active region is almost identical with the observation result, which is to the north of equator in summer and to the south in winter; and the global ISO intensity is stronger in summer than in winter. But the simulation ISO intensity is weaker than the observation and the simulation ISO period is weaker and close to high frequency. Based on the control test simulation result without regard to anthropogenic influence, the interannual and interdecadal variations of the tropical ISO feature under the state of simulative natural variability is studied. The results show, firstly the tropical ISO intensity has the remarkable interannual and interdecadal variations, in the phase of low intensity index, ISO intensity in the active region weakens and the range of the active region reduces; in the phase of high intensity index, the results are opposite, but there is seasonal difference, it is not remarkable in winter but remarkable in spring and autumn, which is identical with the observation result. Secondly, under the state of simulative natural variability, the tropical eastward-propagation or westward-propagation ISO energy ratio maintains an equilibrium state, without rising and descent tendency, which is not identical with the observation result that the tropical eastward-propagation ISO energy ratio rises and westward-propagation ISO energy ratio reduces.

Key words intraseasonal oscillation, numerical simulation, natural variability, interdecadal variation

1 引言

季节内振荡(Intraseasonal Oscillation,简称 ISO),由于是由 Madden 和 Julian^[1,2]首先在热带 大气中的风场和气压场中发现,故通常也称之为 Madden-Julian Oscillation(简称 MJO)。ISO 是热 带大气在 7~90 天时间尺度的最强振荡信号^[3],有 明显的区域分布特征^[4],热带印度洋和热带西太平 洋最强;时域上,ISO强度有明显的季节变化^[5,6], 冬春季强,夏季最弱。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^[7],一直受到气象学界的广泛重视。一些研 究^[4,8]还表明,季节内振荡既有明显的季节变化也 存在明显的年际变化,许多研究^[3,9,10]将 ISO 的年 际变化与 ENSO 现象建立了联系,最近有研究^[3]还 注意到了热带 ISO 的年代际变化。

全球气候正在并且将继续变暖已逐渐成为世界 上大多数科学家的共识^[11],令人感兴趣的问题是 这种气候变暖趋势会对海洋和大气环流系统产生什 么影响?许多研究发现^[12~14],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。 Slingo等^[3]在研究热带 ISO 与热带海洋 SST 之间 的关联时也发现,在年际变化上二者显示了一个弱 的并不显著的关系,但在年代际变化上二者似乎存 在更好的关联。这给予我们一个提示,是否热带 ISO 的较长尺度的变化与增暖有关?

考虑到中国科学院大气物理研究所发展的耦合 模式已经成功地用于气候研究的许多方面[15~16], 在本文我们将利用该耦合模式进行数值模拟并从以 下二方面进行研究:一是自然变率(无人类活动影 响) 下热带 ISO 的变化特征; 二是气候增暖背景 (有人类活动影响)下热带 ISO 的可能变化。这是 因为任何实际的气候变化都是由气候自然变化与人 类活动、其他外部强迫因子引起的变化叠加而成 的[17],而目前普遍认为,过去100年的全球增暖可 能主要是由人类活动向大气排放温室气体造成的, 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[18]。通过对上述两个 方面的对比分析研究,就可以区分出热带 ISO 的哪 些变化是由人类活动(温室气体增加)引起?哪些 变化可能是自然的变化? 由于只有用模式才能产生 自然变率[19],因此,数值模拟研究是开展上述两方 面研究的唯一手段。

Slingo 等^[20]利用大气模式比较计划(AMIP) 中15个AGCM模拟ISO的结果显示,大气环流模 式模拟ISO普遍存在以下不足:低估了ISO振荡强 度,未能体现出 ISO 的季节性特点,模拟的季节内 振荡周期偏短等。根据简单海-气耦合模式能较好 地模拟 ISO 这一特点^[21, 22],李薇等^[23, 24]利用完全 耦合模式对 ISO 模拟效果开展了一些敏感性试验 和评估,研究结果表明,利用完全耦合模式再现 ISO 的季节性特征更真实,反映了海气耦合对 ISO 的调制作用,这也表明耦合模式较单纯大气环流模 式优越,再考虑到研究的时间尺度较长,因此,采 用耦合气候模式进行热带大气季节内振荡的模拟将 是较好的选择。

本文的研究目的是利用 FGOALS1.0_g 耦合 模式控制试验模拟结果探讨在工业革命以前(忽略 人类活动影响)热带季节内振荡年际以上尺度的变 化特征,也就是在自然变化下热带季节内振荡年际 以上时间尺度的变化特征,一方面了解无人类活动 影响情形下热带季节内振荡在较长时间尺度上的变 化特性,另一方面也为进一步研究人类活动对季节 内振荡的影响(将另文讨论)奠定基础。

2 模式简介及资料与方法

2.1 模式及试验设计简介

本文中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 FGOALS 1.0 g (Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model, Version 1.0 g),该耦合模式利用一个通量耦合器,将海 洋、大气、陆面和海冰四个分量模式耦合在一起, 在模式界面上考虑了热量、动量和淡水通量的耦 合,并且没有使用任何形式的通量订正技术。其中 的海洋分量模式是在 LICOM 1.0^[25, 26]的基础上改 动而来的,主要变化将模式的水平范围从 65°N 扩 展到北极,同时因受计算机能力的限制,还将模式 的水平分辨率由 0.5°×0.5°降为 1°×1°。改变以后 的海洋模式计算速度大为提高, 而模式的基本性能 与原来差别不大。关于该耦合模式的进一步说明可 以参见 Yu 等[27, 28]的研究工作。该耦合模式的大 气分量模式是 GAMIL 1.0, 该模式是 Wang 等^[29] 将 NCAR 的大气环流模式 CAM2 中的物理过程引 进到一个新发展的格点大气动力框架中发展而成 的。GAMIL 1.0 的水平分辨率大约为 2.8°×2.8°, 模式可以比较成功地模拟大气的基本型式。

FGOALS 1.0_g 中的海冰分量模式是一个热力-动 力学海冰模式^[30]。该海冰模式在垂直方向有 5 层, 其动力学过程是基于弹性-塑性流变学原理,而热 力过程则采用了一种能量守恒的处理办法。鉴于耦 合器要求海洋和海冰模式的格点必须完全一致,在 本文中作者将海冰模式的水平分辨率提高到与海洋 环流模式 LICOM 完全一致的 1°×1°的经纬网格, 而不是原先的将北极点旋转到大陆上的正交曲线坐 标,同时海冰模式也采用 LICOM 完全一样的海陆 分布。关于该耦合模式的具体描述可以参见 Yu 等^[27, 28]的研究工作。

利用该耦合模式,我们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的加倍试验。本文的第 I 部分 主要利用工业革命前控制试验(简称控制试验,即 模拟的自然变率)模拟结果研究模拟的自然变率下 大气 ISO 的一些变化特征;第 II 部分则利用对比 控制试验和加倍试验模拟的 ISO 现象,探讨全球变 暖对 ISO 的可能影响。

2.2 资料与方法

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,该类资料主要用于对 模式模拟结果评估对比时使用。另一类资料就是利 用上述耦合气候模式模拟的模式结果资料,我们选 取了与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的加倍试验(共 70 年) 所对应的控制试验中 60 年逐日模拟结果资料,包 括高层(200 hPa)和低层(850 hPa)经、纬向风, 下垫面海表水温、降水等要素资料,取 60 年主要 是与实测资料的 56 年 NCEP/NCAR 资料近似等 长,以方便对比。

本文所使用的诊断方法主要有 ISO 指标场方法、时空谱方法^[31]、小波分析方法^[32]等。

3 模拟的自然变率下大气季节内振荡 的基本特征

在进行自然变率下热带 ISO 年际与年代际变化 特征的研究之前,首先分析用 FGOALS 1.0_g 耦合 模式控制试验模拟结果模拟的季节内振荡的一些基 本特征,如活跃区位置、季节变化及 ISO 周期等。 Slingo 等^[20]在利用大气模式比较计划(AMIP) 中 15 个模式检验 AGCM 模拟 ISO 的能力后指出, 对气候基本态的准确描述是模式能够刻画出实际的 大气季节内振荡的先决条件。我们将 FGOALS 1.0_g 耦合模式模拟的气候基本态与实际的气候基 本态(由 NCEP/NCAR 资料计算)进行了比较(图 略),发现 FGOALS 1.0_g 耦合模式能很好再现实 际的气候基本态,这为 FGOALS 1.0_g 耦合模式 能较好地模拟季节内振荡奠定了一定基础。

为较好地描述 ISO 的区域特征、季节变化以及 年际、年代际变化特征,本文通过创建一个 ISO 强 度指标场来实现,并借助这个 ISO 强度指标场,通 过对比模拟结果与实际结果 (NCEP/NCAR 资料 得到)来检验在季节内尺度上模式的性能。

ISO 强度指标场的计算过程大致如下:首先, 对选定的区域(既可以是全球也可以是整个热带区 域)的每一点逐日时间序列进行 20~100 天带通滤 波;然后,利用滑动窗口技术,取滑动步长为1个 日历月份,并以 100 天为窗口宽度来计算其方差以 代表该日历月份的方差即 ISO 强度;最后,为消除 局地方差的影响,同时计算该点的总方差(用滤波 前的时间序列),并取季节内方差与总方差的比值 代表所选点的 ISO 强度。利用上述方法得到的是 一个随时间、空间变化的场,由于它描述的是 ISO 强度(相对值),故称之为 ISO 指标场。

539

图1给出了利用 NCEP/NCAR 再分析资料由 上述指标场(要素取 200 hPa 速度势)计算的1月、 4月、7月、10月(分别代表冬、春、夏、秋四季) 1949~2002年多年平均的全球 ISO 强度空间分布。 此图代表了全球 ISO 强度季节变化的平均特征。 因 20~100天滤波因素,丢掉了两头部分信息,为 保持完整性,我们采用去掉头尾两年不完整结果 (以下处理类似)。

由图 1 可以看出, ISO 指标较好地描述了季节 内振荡的空间分布和季节变化特征: ISO 活跃区 (强度高值区)主要位于热带印度洋和热带西太平 洋;有明显季节变化,冬春季强,夏秋季弱;冬季, ISO 活跃区位置偏南,夏季, ISO 活跃区位置偏北。

图 2 是由 FGOALS 1.0_g 耦合模式控制试验 模拟结果分析得到的不同季节 200 hPa 速度势的全 球 ISO 强度空间分布图 (58 年平均)。由图 2 可以 发现,首先,模拟的自然变率下的 ISO 活跃区主要 位于印度洋与西太平洋,这与近六十年来的观测分 析结果基本接近,虽然自然变率下的分析结果由于 不包括人类活动影响,因而与实测结果不完全具有 可比性,但此结果表明,大气 ISO 活跃区的位置主



图 1 用 56 年 NCEP/NCAR 再分析资料分析得出的 200 hPa 速度势 ISO 强度在不同季节的空间分布 (54 年平均)。阴影为超过 0.50 的区域 Fig. 1 The spatial distribution of 200 hPa velocity potential ISO intensity in different seasons (54-year mean) based on NCEP/NCAR 56-year reanalysis data, the regions that the intensity ratio is above 0.50 are shadowed

要位于印度洋与西太平洋是其基本特征之一;其次,模拟的自然变率下的 ISO 冬季主要活跃区的位置偏南,夏季偏北的特征也很明显,这与观测分析结果的变动趋势完全一致;第三,模拟的自然变率下的 ISO 冬春强、夏季弱的季节变化也较明显;这与实测分析结果一致。

但也可以看出,模拟的 ISO 强度要比观测结果 弱,这可能有两方面的原因,其一可能是模式本身 的问题,因为模拟的 ISO 强度偏弱是单纯大气环流 模式的一个较为普遍的现象^[20,31],耦合模式可能 同样不能完全避免,这与大气模式中所取的对流参 数化方案有一定关系^[20];其二可能就是自然变率 状况下 ISO 的特征,关于这一问题可以通过对比考 虑人类活动影响的加倍试验(模拟结果将在第 II 部 分进行讨论)。

图 3 进一步给出了用 NCEP/NCAR 再分析资



图 2 用 60 年 FGOALS 1.0_g 耦合模式控制试验资料分析得出的 200 hPa 速度势 ISO 强度在不同季节的空间分布 (58 年平均)。阴影为 超过 0.42 的区域

Fig. 2 The spatial distribution of 200 hPa velocity potential ISO intensity in different seasons (58-year mean) based on 60 year FGOALS 1.0_g control test simulation, the regions the intensity ratio is above 0.42 are shadowed



图 3 NCEP/NCAR 再分析资料 (a) 与 FGOALS 1.0_g 耦合模式控制试验模拟结果 (b) 的赤道海区 200 hPa 速度势时空谱分析结果 Fig. 3 The space-time power spectra of 200 hPa velocity potential based on NCEP/NCAR reanalysis data (a) and FGOALS 1.0_g control test simulation (b)

料以及海气耦合控制试验模拟结果资料对赤道海区 (10°S~10°N) 200 hPa 速度势进行时空谱分析得到 的结果,时空谱计算是对每一年资料逐年计算,最 后计算多年平均。其中,图 3a 为 NCEP/NCAR 再 分析资料计算结果 (56 年平均),图 3b 为海气耦合 控制试验模拟结果 (60 年平均)。与 NCEP/NCAR 结果 (图 3a)相比,耦合模式模拟的 ISO 周期 (图 3b)明显偏弱,且仅在高频段有一小峰值,表明模 拟的自然变率下的 ISO 周期偏弱。这同样可能有 两方面原因,其一是数值模式模拟 ISO 结果的一个 较为普遍现象,Slingo 等^[20]在 AMIP 比较计划中所 使用的 15 个模式大多都有这样的特点,FGOALS 1.0_g 耦合模式同样也未能避免;其二可能与自然 变率本身有关。是哪方面的原因将在本研究的第 II 部分作进一步的探讨。

4 自然变率下热带 ISO 强度的年际 与年代际变化特征

为了探讨热带 ISO 强度的年际与年代际变化 特征,我们定义一个用以描述热带 ISO 强度随时间 变化的指标。对上面获得的 ISO 强度指标场,我们 取整个热带区域(30°S~30°N,0°~360°E),对该 区域的 ISO 强度指标场进行 EOF 展开,将所获得 的空间第一特征向量(占总方差的 26.54%)对应 的时间系数作为热带 ISO 强度指数,由于热带 ISO 强度的季节变化明显,计算前进行了消除季节变化 的处理以便突出年际与年代际变化。

空间第一特征向量的空间分布显示出(图略), 热带印度洋与热带西太平洋是 ISO 强度高值区,表 明空间第一特征向量代表了热带 ISO 的主要空间 分布特征。图4给出了对应空间第一特征向量的时 间系数,即热带 ISO 强度指数的年际与年代际变化 曲线,图中的年际与年代际变化曲线系利用小波的 滤波特性由小波分解重构方法计算得出,此图反映 了模拟的自然变率下热带 ISO 强度的年际与年代 际变化。由图 4 可以看出,模拟的自然变率下的热 带 ISO 既存在明显的年际变化也存在年代际变化。 对年际变化的周期特征,我们用 Morlet 小波进行 了时频分析,结果发现(图略),模拟的自然变率下 热带 ISO 强度存在 2~10 年之间的准周期变化,其 中,前40年10年周期较明显,但在有些时段也存 在 2~3 年左右的周期变化;后 20 年以 5~7 年左 右准周期为主。

541

图 4b 表明,模拟的 58 年自然变率下热带 ISO 强度的年代际变化也较明显,就所研究的时段而 言,总体变化趋势是下降的。最初的 15 年热带 ISO强度较强,然后逐渐减弱,在 35~53 年这个时 段最弱,之后又有所增强。为了进一步说明年代际 变化的差异,我们选取了两个时段(如图 4b),选 取第2 年至第19 年这18 年代表热带 ISO 强度高指 数时段,而 35~52 年这个时段代表热带 ISO 强度 低指数时段。分别计算了这两个时段模拟的全球



图 4 用 FGOALS1. 0_g 耦合模式模拟的自然变率下的热带 ISO 强度指数的年际 (a) 与年代际变化曲线 (b) Fig. 4 The interannual (a) and interdecadal (b) curves of tropical ISO intensity index under the condition of simulative natural variability based on FGOALS1. 0_g control test simulation

ISO 强度在不同季节的空间分布图。

在热带 ISO 强度较强时段(图 5),与平均情况 相比(图 2), ISO 强度与范围有增强与扩大趋势, 但主要是春季和秋季变化稍明显,冬季并不明显。 在热带 ISO 强度较弱时段(图 6), ISO 强度与范围 则明显减弱与缩小,但同样也存在季节性差异,冬 季变化不大。如果就高低强度指数时段之间进行对 比,自然变率下的热带 ISO 强度的年代际变化是相 当明显的,但是存在季节性差异,冬季变化不大, 春秋季最明显。

给出了用 NCEP/NCAR 资料计算得出的偏冷 阶段(图7)和偏暖阶段(图8)不同季节多年平均 全球大气 ISO 强度的空间分布,阶段的划分是依据 全球地面平均气温变化特征(图略)确定的,1948 ~1976为偏冷阶段,1977~2003为偏暖阶段。 通过图7、8的对比可以发现,偏暖阶段大气ISO



图 5 用 FGOALS 1. 0_g 耦合模式控制试验模拟的热带 ISO 强度高指数时段全球 ISO 不同季节的空间分布。阴影为超过 0. 42 的区域 Fig. 5 The spatial distribution of 200 hPa velocity potential tropical ISO intensity in different seasons (58-year mean) for the period of high intensity index based on 60 year FGOALS 1.0 g control test simulation, the regions the intensity ratio is above 0. 42 are shadowed



Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the period of low intensity index



图 7 偏冷阶段 200 hPa 速度势 ISO 强度在不同季节的空间分布。阴影为超过 0.50 的区域 Fig. 7 The spatial distribution of 200 hPa velocity potential ISO intensity in different seasons for the cold period based on NCEP/NCAR 56-year reanalysis data, the regions that the intensity ratio is above 0.50 are shadowed





无论是强度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。实 测结果在两个不同阶段的变化特征与模拟的自然变 率下的高/低指数阶段的变化特征基本一致,但实测分析结果似乎表明增暖对应高指数阶段,偏冷对应低指数阶段,即增暖可能是 ISO 强度增强、范围

543

扩大的原因。

5 自然变率下热带 ISO 的传播特征

研究热带 ISO 的传播特征,通常都是采用时空 谱方法^[3,31],本文也采用此方法。另外,为了方便研 究年际与年代际变化,时空谱计算中也采用了滑动 窗口技术^[31],并取窗口宽度为 365 天 (1 年),滑动 步长为1个日历月份,这样得到的是逐月的时空谱值。

图 9 给出了用 FGOALS/IAP 海气耦合模式控 制试验模拟的赤道地区 (10°S~10°N) 大气 200 hPa 速度势东传 (图 9a)和西传 (图 9b) 1~6 波 ISO 时空功率谱比值 (1~6 波 ISO 时空功率谱之 和与 ISO 时空功率谱总和之比)的年代际变化曲 线,用以描述自然变率下热带 ISO 主要的东传和西 传波能量随时间的变化。其中,1~6 波 ISO 时空 功率谱比值是前 6 个东传 (或西传) 波时空功率谱 之和与季节内振荡总时空功率谱之比,采用比值的 目的是比较相对大小。

由图 9 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平均约为 60%, 比西传 (38%左右)明显高, 这与观测中东传占优 的实际情况相似^[6,7,18],前 6 个波平均季节内振荡 能量已占季节内振荡总能量的 98% (东传与西传之 和),表明热带 ISO 以前 6 个波为主,这也与实际 观测相似^[7]。由图 9 还可以发现,无论是东传波还 是西传波,虽然 1~6 波 ISO 时空功率谱比值存在 明显的年代际变化,但这种变化不存在明显的上升 或下降趋势,它仅围绕着平均值波动,用低层 850 hPa速度势所得结果相同(图略)。这似乎表明,自 然变率下的热带大气东传或西传的 ISO 能量虽然 也存在年际与年代际变化,但从长期来看基本维持 一种平衡状态。

作为对比,我们给出的近六十年来实际状况下的对应结果,图 10 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 之和季节内振荡能量相对比值的年代际变化曲线。

由图 10 可以发现,首先,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。模拟 的自然变率下的分析结果与实测结果明显不一致。

6 结论

本文利用中国科学院大气物理研究所 LASG 发展的 FGOALS 1.0_g 耦合模式控制试验(主要 温室气体 CO2含量维持工业革命前的 280×10⁻⁶不 变)模拟结果,研究了模拟的自然变率下热带大气季 节内振荡的时空变化特征,主要得到了以下结论:

(1) 模拟的自然变率下的大气季节内振荡的主 要活跃区位于印度洋及西太平洋,与近六十年的实



图 9 用 FGOALS 1.0_g 耦合模式控制试验模拟的赤道地区 (10°S~10°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. 9 The interdecadal curves of 200 hPa velocity potential ISO space-time power spectra ratio in the equator region $(10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N})$ for east-ward propagating (a) and westward propagating (b) wave numbers 1-6 based on 60 year FGOALS 1. 0_g control test simulation



图 10 用 56 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料分析得到的赤道地区 (10°S~10°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. 10 The interdecadal curves of 200 hPa velocity potential ISO space-time power spectra ratio in the equator region $(10^{\circ}S - 10^{\circ}N)$ for eastward propagating (a) and westward propagating (b) wave numbers 1 - 6 based on NCEP/NCAR 56-year reanalysis

测分析结果接近; 主要活跃区位置的季节变动以及 冬强夏弱的季节变化与实测结果基本一致; 模拟的 自然变率下的 ISO 强度偏弱; 模拟的自然变率下的 ISO 周期偏弱且偏高频。

(2)模拟的自然变率下的季节内振荡强度存在 明显的年际与年代际变化。模拟的自然变率下的热 带大气 ISO 强度年际变化周期在 2~10 年之间变 动,控制试验的约 60 年变化中,前 40 年以 9~10 年左右周期变化为主,后 20 年以 5~7 年左右周期 变化。模拟的自然变率下的热带大气 ISO 强度高/ 低指数时段,主要活跃区的强度也相应变强/弱, 范围相应扩大/缩小,但存在季节性差异,冬季变 化不明显,春秋季最明显;实测分析结果有类似情 况,但由实测结果推断 ISO 强度变化与增暖有关。

(3)模拟的自然变率下的热带大气东传或西传的 ISO 能量虽然也存在年际与年代际变化,但这种变化基本上是围绕平均值上下波动,不存在上升或下降趋势,即从长期来看基本维持一种平衡状态;此结果与实际状况下的东传相对能量增强、西传相对能量减弱趋势明显不同。

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利用中国科 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] Madden R A, Julian P R. Description of a 40-50 day oscilla-

tion in the zonal wind in the tropical Pacific. J. Atmos. Sci. , 1971, 28: $702 \sim 708$

- Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40 50 day period. J. Atmos. Sci., 1972, 29: 1109~1123
- [3] Slingo J M, Rowell D P, Sperber K R, et al. On the predictability of the interannual behaviour of the Madden-Julian oscillation and its relationship with El Niño. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**: 583~609
- Salby M L, Hendon H H. Intraseasonal behavior of clouds, temperature, and motion in the tropics. J. Atmos. Sci., 1994, 51 (15): 2207~2224
- [5] Madden R A. Seasonal variations of the 40 50 day oscillation in the tropics. J. Atmos. Sci., 1986, 43 (24): 3138~ 3158
- [6] Madden R A, Julian P R. Observations of the 40 50 day tropical oscillation—A review. Mon. Wea. Rev., 1994, 122: 814~837
- [7] 李崇银.大气低频振荡.北京:气象出版社,1993.310pp Li Chongyin. Low-Frequency Oscillation in the Atmosphere (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 310pp
- [8] Wang B, Xie X. A model for the boreal summer intraseasonal oscillation. J. Atmos. Sci., 1997, 54: 72~86
- [9] Lau K M, Chan P H. The 40-50 day oscillation and the El Niño/Southern Oscillation: A new perspective. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1986, 67 (5): 533~534
- [10] 李崇银,李桂龙.赤道太平洋大气低频振荡与海表水温的关系.科学通报,1999,44 (1):78~81
 Li Chongyin, Li Guilong. The relation between atmosphere low-frequency oscillation and SST in equator Pacific, *Chinese*

Science Bulletin (in Chinese), 1999, 44 (1): 78 ${\sim}81$

- [11] 王绍武.近百年气候变化与变率的诊断研究. 气象学报, 1994, **52** (3): 261~273
 Wang Shaowu. Diagnostic studies on the climate change and variability for the period of 1880-1990. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1994, **52** (3): 261~273
- [12] Wang Bin. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. J. Climate, 1995, 8 (2): 267~285
- [13] 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(D),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
- [14] 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*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 2003. $16\sim27$

- [15] 李志强,俞永强,王谦谦.利用海气耦合模式模拟印度尼西 亚贯穿流.大气科学,2005,29:697~708
 Li Zhiqiang, Yu Yongqiang, Wang Qianqian. Simulation of Indonesian throughflow with a coupled ocean - atmosphere model. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 29:697~708
- [16] 刘喜迎,张学洪,宇如聪,等.一个海-冰-气耦合模式中格陵 兰海海冰年际变异及其成因的个例分析.大气科学,2005, 29:795~804

Liu Xiying, Zhang Xuehong, Yu Rucong, et al. A case study of interannual anomaly in Greenland sea in an ocean – sea ice – atmosphere coupled model. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), **29**: 795~804

- [17] 江志红,屠其璞,施能.年代际气候低频变率诊断研究进展. 地球科学进展,2000,15(3):342~347
 Jiang Zhihong, Tu Qipu, Shi Neng. Advance in diagnosis study of multidecadal low frequency variability. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 2000, 15(3):342~347
- [18] 张兰生,方修琦,任国玉. 全球变化. 北京:高等教育出版 社,2000. 341pp
 Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu. *Global Change* (in Chinese). Peking: Higher Education Press, 2000. 341pp
- [19] 王绍武,朱锦红. 国外关于年代际气候变率的研究. 气象学报, 1999, **57** (3): 376~383
 Wang Shaowu, Zhu Jinhong. A review of overseas on interdecadal variability. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (3): 378~383
- [20] Slingo J M, Sperber K R, Boyle J S, et al. Intraseasonal oscillations in 15 atmospheric general circulation models: Re-

sults from an AMIP diagnostic subproject. Climate Dyn. , 1996, $\mathbf{12}_1$ 325 ${\sim}357$

- [21] Wang B, Xie X. Coupled modes of the warm pool climate system. Part I: The role of air – sea interaction in maintaining Madden-Julian oscillation. J. Climate, 1998, 11: 2116 ~ 2135
- [22] Waliser D E, Lau K M, Kim J-H. The influence of coupled sea surface temperatures on the Madden-Julian oscillation: A model perturbation experiment. J. Atmos. Sci., 1999, 56: 333~358
- [23] 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): 118~132
 Li Wei, Yu Yongqiang. Intraseasonal oscillation in a coupled general circulation model. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences* (in Chinese), 2001, 25 (1): 118~132
- [24] Li Wei, Yu Rucong, Zhang Xuehong. Impacts of sea surface temperature in the tropical Pacific on interannual variability of Madden-Julian oscillation in precipitation. Adv. Atmos. Sci., 2001, 18 (3): 429~444
- [25] 刘海龙, 俞永强, 张学洪, 等. LASG/IAP 气候系统海洋模式用户手册. 北京: 科学出版社, 2004. 128pp
 Liu Hailong, Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, et al. LASG/IAP Climate System Ocean Model User Guide (in Chinese).
 Beijing; Science Press, 2004. 128pp
- [26] Liu Hailong, Zhang Xuehong, Li Wei, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluations. Adv. Atmos. Sci., 2004, 21: 675~690
- [27] Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model. Adv. Atmos. Sci., 2002, 19: 169~190
- [28] Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, Guo Yufu. Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in LASG/IAP. Adv. Atmos. Sci., 2004, 21: 444~455
- [29] Wang Bin, Wan Hui, Ji Zongzhen, et al. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Science in China* (Series A), 2004, 47: 4~21
- [30] Bitz C M, Holland M M, Weaver A J, et al. Simulating the ice-thickness distribution in a coupled climate model. J. Geophys. Res., 2001, 106: 2441~2464
- [31] 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,2000.176pp
 Chen Xingyue, Wang Huijun, Zeng Qingcun. Atmosphere Intraseasonal Oscillation and Its Interannual Variation (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000.176pp
- [32] 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. 174pp
 Lin Zhenshan, Deng Ziwang. The Research on Wavelet Climate Diagnostic Technology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 174pp