

全球变暖背景下热带大气季节内振荡 的变化特征及数值模拟*

刘芸芸^{1,2} 俞永强² 何金海¹ 张振国³

1 南京信息工程大学大气科学系,南京,210044

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和数值模拟国家重点实验室(LASG),北京,100029

3 江苏省兴化市气象局,兴化,225700

摘要

利用欧洲中期数值预报中心的 ERA40 再分析逐日的 200 hPa 风场资料,选取 1958—1977 年和 1980—1999 年各 20 年,对比分析了在全球变暖背景下前后两个时段热带大气季节内振荡(ISO)的特征及其变化。研究表明:近 20 a 来,原来在赤道中太平洋上活跃的 ISO 减弱,而在中印度洋、孟加拉湾地区 ISO 变得活跃;全球变暖背景下,ISO 的强度变化幅度加大,表明 ISO 更加活跃,且季节变化明显,冬、春季强,夏、秋季弱;对流层上层的纬向风能量更集中于 1—3 波,ISO 的频率有加大的趋势。还利用中国科学院大气物理研究所 LASG 发展的耦合气候系统模式 FGOALS-1.0g 中的控制试验及其二氧化碳浓度加倍试验结果,分别对应实测资料的前后 20 年进行对比分析。发现模式对 ISO 的空间结构模拟较好,但低估了 ISO 的强度;时空谱分析表明模式结果中包含有更多的纬向风的高频成分,由于能量的分散,导致对 ISO 活动强度的低估。但通过对模式的控制试验和温室气体增加试验结果的对比分析,发现耦合模式还是较好地反映出在全球变暖背景下 ISO 在中印度洋、孟加拉湾地区变得活跃、频率加大等变化特征。

关键词:全球变暖,热带大气季节内振荡(ISO),耦合模式。

1 引言

大气季节内振荡(ISO)是大尺度热带大气活动最显著的振荡信号之一,也被视为是一种重要的大气环流系统之一。自 Madden 等^[1-2]发现 ISO 以来,国际上众多科学家对其进行了广泛的研究,对 ISO 的结构特征和基本活动规律有了比较清楚的认识^[3-7]。ISO 是发生在全球范围内的大气现象,其中以热带地区更为显著,且有明显的区域分布特征^[8],热带印度洋和热带西太平洋最强。ISO 具有纬向 1 波为主的行星尺度空间结构,在热带地区最为显著,主要以向东传播为主,但也存在西传情况;ISO 表现为 30—90 d 的宽频带振荡周期,在 50—60 天有强谱峰^[9];ISO 的垂直结构通常表现为对流层

上、下反相的“斜压”性;ISO 本身存在显著的季节变化和年际变化^[10-11],一般在冬春季达到最强;此外,热带 ISO 强度也存在明显的年际变化,甚至年代际变化。

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^[12],目前普遍认为,过去 50 a 的全球增暖可能主要是人类活动向大气排放温室气体造成的^[13],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。在近 50 a 里,仅仅由于增加的温室气体引起的增暖的速率和幅度估计值与观测到的升温值相当,或比后者略大^[14]。那么全球变暖的气候趋势会对大气环流及海洋系统产生怎样的影响呢?已有研究发现^[15-18],20 世纪 70 年代中后期气候系统出现了一次突变,

* 初稿时间:2005 年 10 月 13 日;修改稿时间:2006 年 1 月 10 日。

资助课题:国家自然科学基金项目(90211011)、国家自然科学基金项目(40231004)、科技部“十一五”攻关项目(2001BA611B01)和中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目“气候系统模式研发及应用研究”。

作者简介:刘芸芸,女,1981 年生,江西南昌人,硕士,主要从事季风、气候变化研究。Email: liuyy@mail.iap.ac.cn

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。利用全球大气环流模式 (AGCM) 模拟 ISO 的效果不能令人满意。大气模式比较计划 (AMIP) 中 15 个 AGCM 模拟 ISO 的结果显示^[19], 虽然大多数模式能够反映大气季节内时间尺度的振荡信号, 体现对流层上层速度势异常场的东向传播, 但严格来讲, 尚无一个模式真正再现了观测发现的季节内时间尺度上 ISO 的最显著振荡信号。作为对比, 利用海洋-大气耦合模式模拟 ISO 要比 AGCM 好许多^[20-21], 即使仅考虑大气模式与简化、平板的混和层海洋模式相互作用, 也使海气耦合模式对 ISO 的模拟效果显著提高。

近期蒋国荣等利用 NCEP 资料计算速度势等来研究热带大气季节内振荡的变化特征, 而本文则利用欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) ERA40 中的

200 hPa 逐日风场资料^[22-23], 考虑到近几十年来全球温度的增暖是从 70 年代后期开始到现在 (图 1)^[14], 因而选取了 1958—1977 年和 1980—1999 年各 20 年, 前 20 年定义为相对冷期, 气温值相对较低, 后 20 年则为全球气温持续上升期, 定义为增暖期, 对比分析这两个时段季节内振荡 (ISO) 的不同特征。由于有研究表明^[14], 过去 50 年观察到的大部分增暖可以归咎于人类活动, 因此本文仅仅考虑由于人类活动使得二氧化碳浓度加大所导致的全球变暖背景下, 利用 LASG 发展的耦合气候系统模式 FGOALS-1.0g 中的两个试验结果, 工业革命前的控制试验和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, 分别对应上述两个不同的时段, 进行模拟研究 ISO 现象, 讨论在全球变暖背景下 ISO 可能发生的变化。

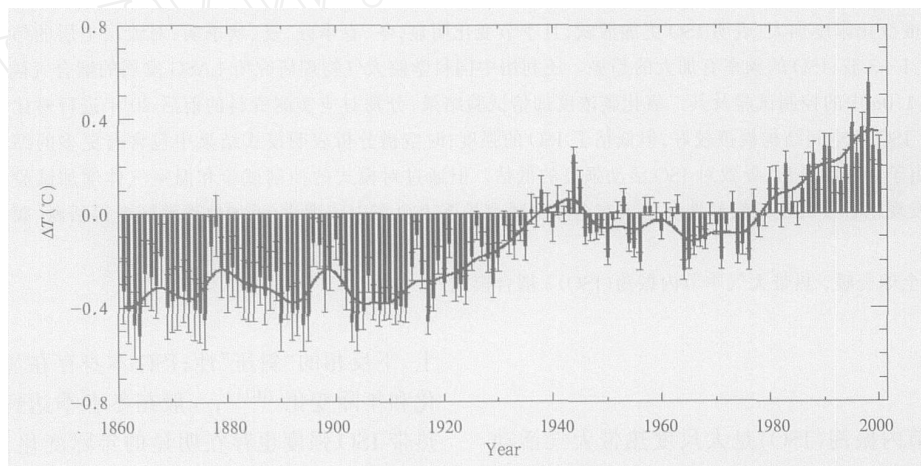


图 1 1850—2000 年全球平均气温距平变化曲线 (引自 IPCC 第三次科学评估报告^[14])

Fig. 1 Time series of the observed global mean surface air temperature from 1850 to 2000 (from IPCC TAR)

需要特别指出的是, 1958—1977 年与 1980—1999 年前后两段时间 ISO 特征的变化, 其原因可能不仅仅是 CO_2 浓度的增加, 也许还存在其他的原因。在本文中, 我们通过分析一个耦合模式 CO_2 倍增数值模拟试验结果, 试图讨论在耦合模式中全球变暖是如何影响 ISO 的时间和空间特征变化的; 进而将模式模拟的 ISO 在全球变暖背景下的变化与观测前后 20 年之间 ISO 变化特征相比较, 分析它们之间的异同, 如果两者相似程度比较大, 则非常可能意味着 1958—1977 年和 1980—1999 年两段时间 ISO 特征的变化应该主要归因于 CO_2 增加引起的

全球变暖。当然, 在最近 50 年 CO_2 变化幅度不至于加倍, 远小于模式中考虑的 CO_2 浓度变化。我们这样做, 是考虑到目前因为耦合模式对 ISO 的模拟能力还十分有限, 特别是模拟的 ISO 强度普遍偏弱, 因此如果仅仅考虑实测的 CO_2 浓度变化, 耦合模式模拟的 ISO 变化的信号肯定会更加弱。因此在本研究中我们有意夸大了 CO_2 浓度的实际变化情形, 以利于更清楚地看到在耦合模式中 ISO 对全球增暖的响应。当然这样做的结果, 使得我们只能定性分析 ISO 在全球变暖背景下的变化特征, 而不能给出定量的描述, 我们将在后续的研究工作中

寻找更为妥善的办法解决此问题。

2 模式介绍

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4代耦合气候系统模式 FGOALS 1.0-g(Flexible Global Ocean Atmosphere-Land System Model, Version 1.0-g),该耦合模式利用了一个通量耦合器将海洋、大气、陆面和海冰4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,主要变化是将模式的水平范围从 65°N 扩展到北极,同时还因受计算机能力的限制,将模式的水平分辨率由 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 降为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。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。该耦合模式的大气分量模式是 GAMIL 1.0,该模式是 Wang 等^[27]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形成的。GAMIL 1.0 的水平分辨率大约为 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$,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^[28]。该海冰模式在垂直方向上有 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,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 $1^\circ \times 1^\circ$ 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与 LICOM 完全一致的海陆分布。关于该耦合模式的进一步说明可以参见 Yu 等^[29-30]的研究工作。

利用该耦合模式已完成了多个长期气候变化数值模拟试验^[30],其中包括工业革命前控制试验(以下简称控制试验)和大气中 CO_2 浓度从工业革命前的 280×10^{-6} 以每年 1% 等比增加,大约到第 70 模式年模式中 CO_2 浓度增加到 560×10^{-6} ,即 CO_2 浓度加倍(以下简称加倍试验),然后模式中 CO_2 浓度保持在 560×10^{-6} 不变继续向前积分 150 a。从图 2 可见,由于大气中 CO_2 浓度的加倍,该耦合模式模拟的全球平均气温最终增加大约 1.7°C ,这个结果

和大多数耦合模式的模拟结果基本一致^[14]。本文选取了以上两个试验的第 200 到 220 模式年各 20 个模式年的 200 hPa 纬向风,分别对应 ECMWF 逐日再分析资料的 1958—1977 和 1980—1999 年,评估试验模拟 ISO 的基本能力,利用对比控制试验和加倍试验模拟的 ISO 现象,探讨在全球变暖背景下 ISO 可能发生的变化。

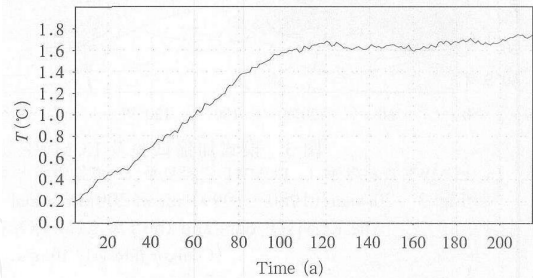


图 2 耦合模式 CO_2 加倍试验模拟的全球平均气温变化曲线

Fig. 2 Time series of the simulated global mean surface air temperature a CO_2 doubling experiment with the coupled GCM (unit: $^\circ\text{C}$)

3 气候背景场分析

ISO 对基本气候态的变化十分敏感,对基本气候态的准确描述是模式能够较好地刻划出实际的大气季节内振荡的先决条件^[19],考虑文章的篇幅,因此仅给出模式加倍试验的 20 年气候平均之冬季(12, 1, 2 月)和夏季(6—8 月)200 hPa 纬向风及相应的 1980—1999 年的 ECMWF 再分析资料结果(图 3)。由图可以看到,无论冬夏,模式得到的风场基本型都与实际观测资料相当一致。在热带,对流层上层基本为东风控制。由冬季到夏季,东风中心略向北移,中心强度加强,范围加大。

主要的差别是冬季模式模拟的赤道印度洋向西延伸至大西洋及南美洲北部的东风中心偏强,而在赤道中东太平洋地区的西风带偏弱;夏季,ECMWF 分析结果表明赤道东风带贯穿整个热带区域,而模式东风的纬向扩展不够充分,且在印度洋及孟加拉湾地区模拟的东风也明显偏弱。1958—1977 年的再分析资料与模式控制试验模拟结果比较也有相似的结论(图略)。模式对纬向风场空间结构的季节变化特征的正确再现使其对 ISO 的真实模拟成为可能。

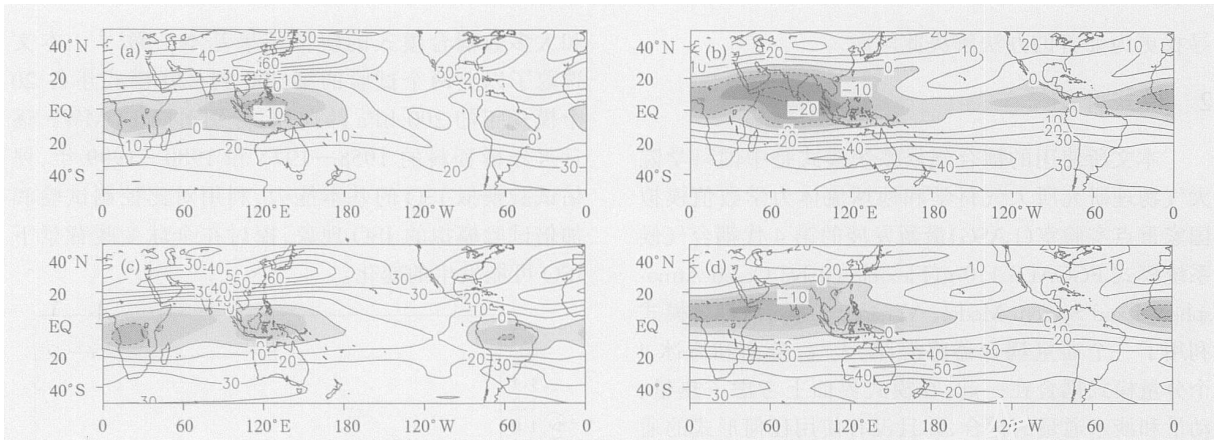


图3 模式加倍试验及 ECMWF 资料 20 a 平均的冬、夏季 200 hPa 纬向风图

(a. ECMWF 资料冬季, b. ECMWF 资料夏季, c. 模式资料冬季, d. 模式资料夏季; 等值线间隔为 10 m/s, 阴影区表示东风, 单位: m/s)

Fig. 3 20-year (1980 - 1999) mean 200hPa zonal wind climatology for (a, c) winter and (b, d) summer from the ECMWF data and the 1%/year CO_2 increase experiment of FGOALS-G1.0g, respectively

(Contour interval: 10m/s; the easterlies are shaded; Unit: m/s)

4 ISO 的周期

分别对 ECMWF 资料的前后 20 年及模式的两个试验的热带地区 200 hPa 平均纬向风(10 S—10 N 平

均)的时间序列(20 a, 7300 个样本)做功率谱分析, 并进行红噪音检验(图 4)。为更加清楚地显示季节内时间尺度的振荡信号, 图 4 中 T 为周期, P 为功率谱值。图中实线为功率谱值, 虚线为 95% 信度水平

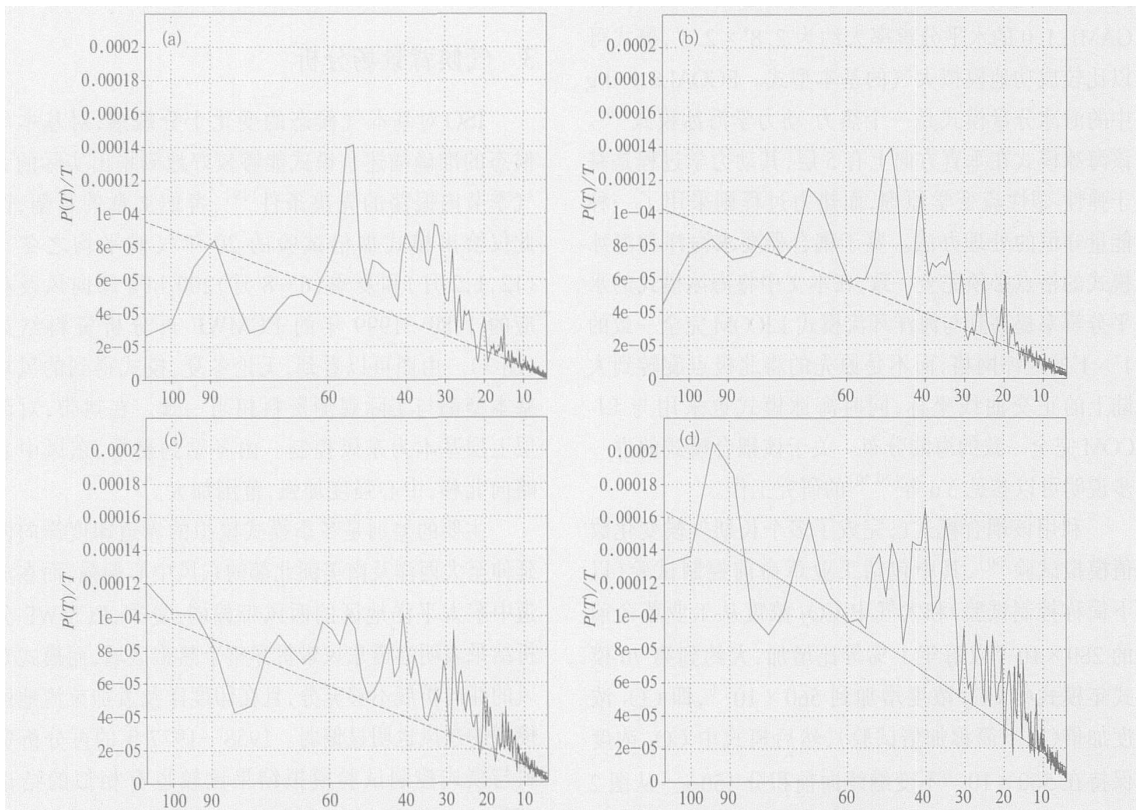


图4 沿 10 S—10 N 平均的 200 hPa 纬向风的功率谱(实线)和 95% 信度检验线(虚线)

(a. ECMWF 资料 1958—1977 年, b. ECMWF 资料 1980—1999 年, c. 控制试验, d. 加倍试验)

Fig. 4 Power spectra (solid line) for the 200 hPa zonal wind averaged over , and the red noise spectra (dashed line) for (a. ECMWF data for 1958 - 1977; b. ECMWF data for 1980 - 1999; c. control experiment; d. 1%/year CO_2 increase experiment)

的 χ^2 检验曲线。可以发现,ECMWF 资料反映的 20—90 d 的周期振荡在 95% 信度水平是显著的,表现为以 50 d 左右的周期为峰值的宽频带振荡,其中在后 20 年(图 4b),周期低于 30 d 的较高频率峰值明显增加。模式结果也有类似的结论,体现在季节内时间尺度有多个振荡谱峰,主要集中在 30—60 d 的频段范围内,加倍试验中 90 d 的周期峰值显著,而低于 30 d 的高频峰值也明显增加,这跟实测资料中后 20 年的结果相对应。

5 ISO 的强度及季节变化特征

关于 ISO 的季节变化,以往的观测研究已经基本确认了冬、春季强而夏、秋季弱的这一特征^[12],而在大气模式比较计划中,几乎所有的大气环流模式在观测的海温强迫下都不能体现 ISO 的这一季节性特点,也是许多大气模式普遍存在的一个弱点^[19]。为了定

量反映 ISO 的活动强度,选择 200 hPa 纬向风季节内变化的方差作为 ISO 指数(图 5),具体做法是计算 10°S—10°N 纬向平均的 200 hPa 纬向风经过 20—100 d 的带通滤波后的方差^[21],然后做逐日的多年平均以突出其季节变化特征。由图可以看出,ECMWF 资料清楚地反映了 ISO 冬春强、夏秋弱的季节变化特征,而模式结果总体上体现了这一季节变化特征,ISO 指数的峰值基本出现在冬春季,但在夏秋季也有个别强峰值,甚至有些比冬春季时还强,并且模式模拟的 ISO 强度普遍都比 ECMWF 实测资料反映的 ISO 要弱许多。Slingo 等^[19]指出,能模拟出强的季节循环的模式就可以模拟出较强的季节内振荡;相反,对 ISO 模拟较弱的模式对季节变化模拟也较弱。这也是模式模拟 ISO 普遍存在的问题,本文这个模式也不例外。

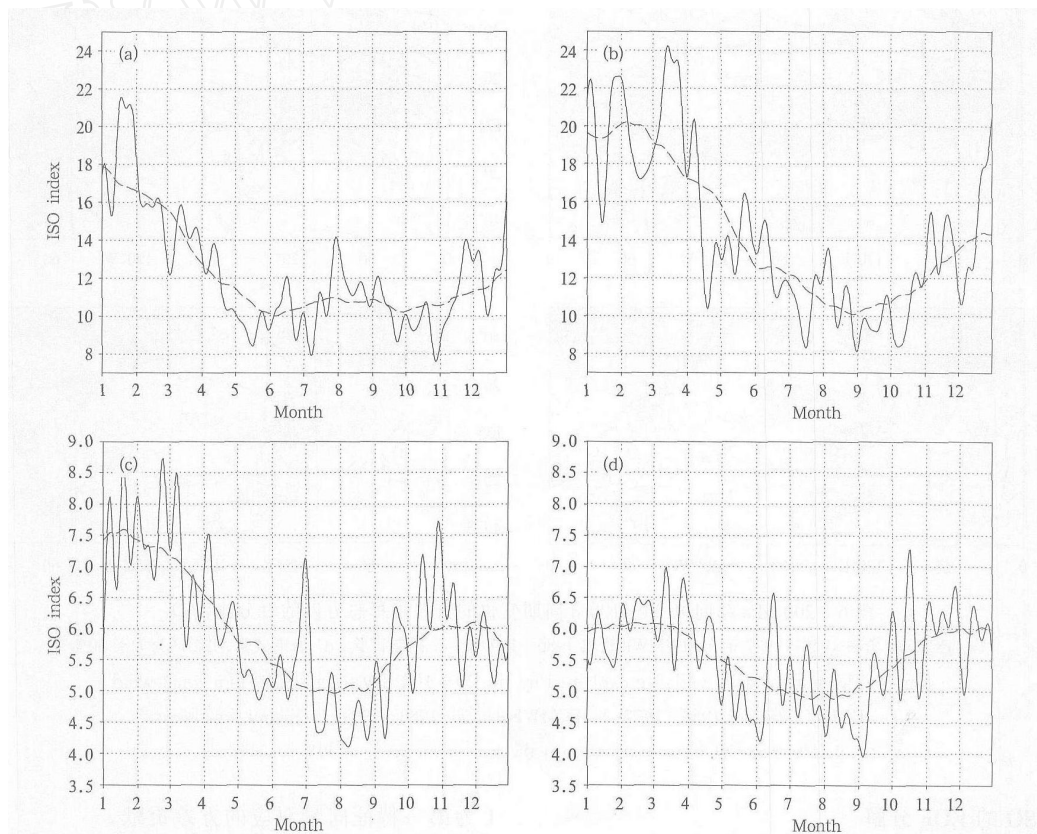


图 5 ISO 指数的强度-时间序列(虚线为平滑的 ISO 指数)

(a. ECMWF 资料 1958—1977 年, b. ECMWF 资料 1980—1999 年, c. 控制试验, d. 加倍试验)

Fig. 5 Temporal series of ISO index (solid line), and its 101 days running mean

(a. ECMWF data for 1958 - 1977; b. ECMWF data for 1980 - 1999;
c. control experiment; d. 1%/year CO₂ increase experiment)

前后 20 年作对比发现,随着全球变暖的加速,ISO 的活动强度有所加强,ISO 指数的变化幅度也增加,说明后 20 年中 ISO 活动更加活跃。而模式结果似乎没有反映出这一变化,加倍试验模拟的 ISO 指数强度比控制试验的还弱一些。这表明,ISO 的模拟成功与否,还依赖于模式刻画各种时间尺度运动的总体能力的提高。

6 ISO 的空间结构

6.1 ISO 的空间分布特征

图 6 给出经 20—100 d 带通滤波后 200 hPa 纬向风解释总方差的百分比的空间分布,反映了 ISO 的不同地域特征。比较 ECMWF 资料的前后 20 a,可以发现,ISO 方差贡献最大的区域在印度洋、孟加拉湾和赤道东太平洋,中心方差贡献值超过 40%,

这与 ISO 的活跃区分布一致;前 20 a 中,在日界线附近的赤道中太平洋地区也有一个大值区,说明前 20 a ISO 在赤道中太平洋上活跃,但到后 20 a,该地区的 ISO 解释总方差的百分比减弱,范围也大大缩小,而在中印度洋、孟加拉湾地区却有所加强,尤其在中印度洋地区,百分比超过 50%,表明这些区域的 ISO 变得活跃。

与模式结果相比,无论是控制试验还是加倍试验,ISO 所解释总方差的百分比中心值和范围都偏小,控制试验中,热带地区只在日界线附近的 ISO 方差贡献超过 30%;而在加倍试验中,中太平洋地区的 ISO 方差贡献减弱,而赤道印度洋、孟加拉湾地区方差贡献加大,超过 30%,这和观测资料中后 20 a ISO 变得活跃的区域是一致的,虽然整体数值都偏小。

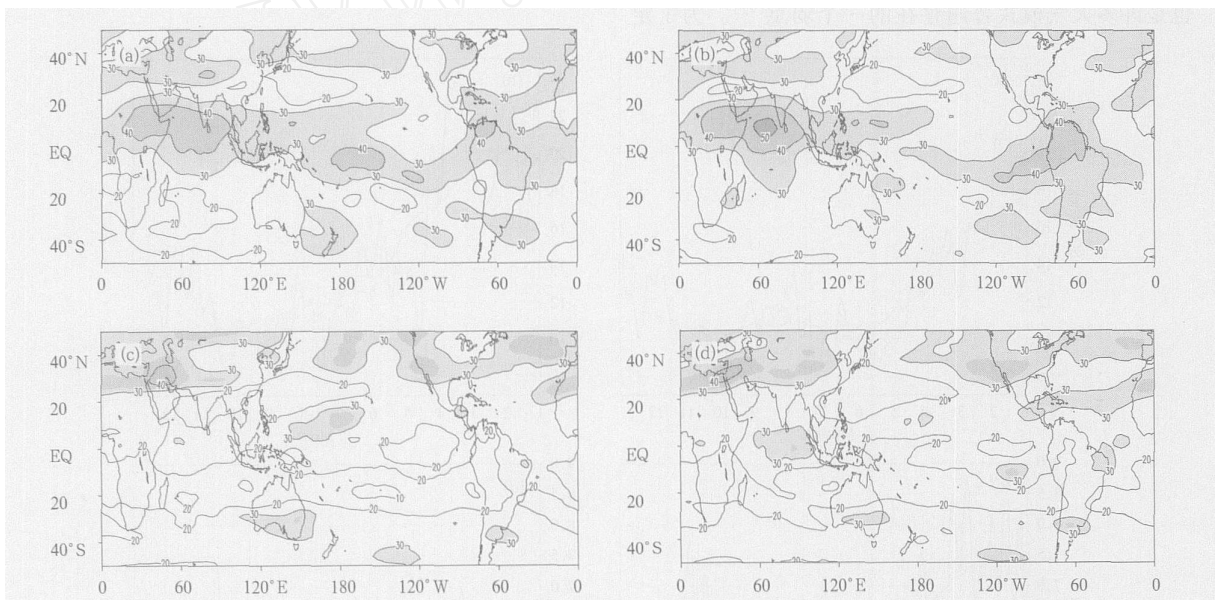


图 6 200 hPa 纬向风 20—100 d 周期变化的方差解释总方差的百分比(%)

(a. ECMWF 资料 1958—1977 年, b. ECMWF 资料 1980—1999 年, c. 控制试验, d. 加倍试验, 阴影区为大于 30%)

Fig. 6 Percents of daily variance explained by the 20 - 100 day filtered 200 hPa zonal wind

(a. ECMWF data for 1958 - 1977; b. ECMWF data for 1980 - 1999; c. control experiment;

d. 1%/year CO₂ increase experiment; the contours in excess of 30% are shaded)

6.2 ISO 的 EOF 分解

从 20 a 的 200 hPa 纬向风资料中挑出每年 11 月至次年 3 月共 151 d,因为在该时间段 ISO 较强。然后将其合并成一组新的时间序列,做 20—100 d 带通滤波,以消除季节变化和年际变化的影响,并进行标准化处理,然后对标准化距平做 EOF 分解。表

1 为第一特征向量对应的方差贡献。

表 1 ISO 的第一特征向量对应的方差贡献

Table 1 Percentage variance explained by the EOF1 of the observed and simulated zonal wind data

	ECMWF 前 20 a	ECMWF 后 20 a	控制试验	加倍试验
EOF-1	12.3%	13.1%	19.2%	18.7%

由于所分析的资料为 17 个 151 d 共 2567 d (滤波后去掉首尾各 151 d), 求标准化距平后再做 EOF 分解, 所得的非零特征值有 2567 个, 第一特征向量的方差贡献都超过 10%, 相对于 2567 个特征值来说, 所占比例较大。因此第一特征向量场基本上反映了 ISO 的空间分布特征。

ISO 的第一特征向量基本代表了 ISO 的主要分布型(图 7)。从 ECMWF 资料分析结果看, 在印度洋和孟加拉湾地区、中西太平洋地区及热带东太平洋各存在一个很强的负值中心, 对应着 ISO 的方差解释总方差的百分比最大的区域, 也是 ISO 最活跃的地区; 而在南太平洋地区为强正值区域。ECMWF 资料前后 20 a ISO 的活跃空间变化不大,

但在后 20 a 中, 印度洋及孟加拉湾地区 ISO 的强度明显加大, 该区域的 ISO 解释总方差百分比也是加大的, 说明随着全球温度的升高, 使得印度洋及孟加拉湾地区的 ISO 活动对整个大气运动来说显得越发重要了。

模式模拟的结果与观测资料非常相似, 第一特征向量场基本反映 ISO 活动的最活跃区域, 大负值中心位于印度洋、孟加拉湾和西太平洋, 赤道东太平洋地区的负值中心较小。而赤道以南地区基本为正值区, 正值中心位于中南太平洋区域。无论正负值中心, 模式模拟的结果都比实际观测资料要小, 这与前面分析 ISO 强度时指出模式模拟的 ISO 强度偏弱一致。

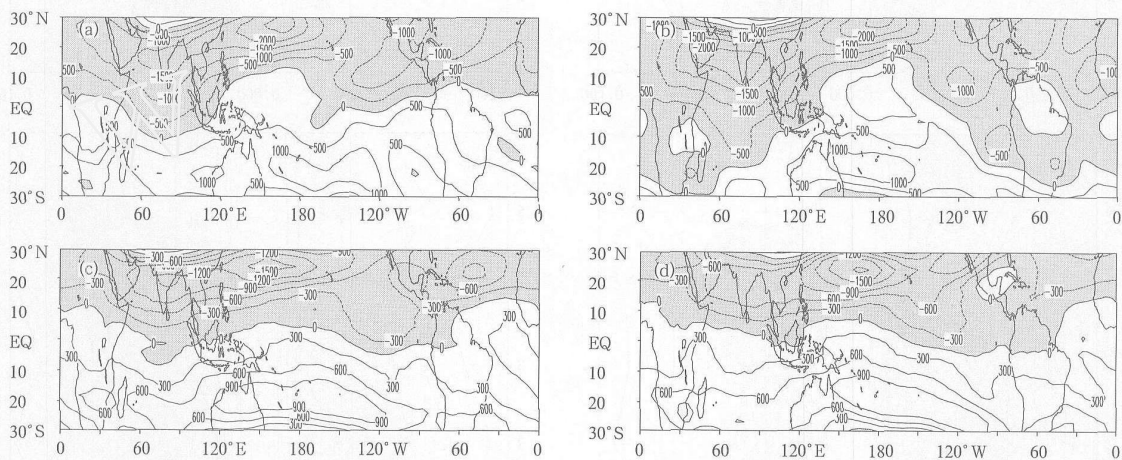


图 7 经 20—100 d 滤波的 200 hPa 纬向风 EOF 展开的第一特征向量场
(a. ECMWF 资料 1958—1977 年, b. ECMWF 资料 1980—1999 年, c. 控制试验, d. 加倍试验)

Fig. 7 Spatial patterns of the EOF1 of 20 - 100 day filtered zonal wind
(a. ECMWF data for 1958 - 1977; b. ECMWF data for 1980 - 1999; c. control experiment; d. 1 %/ year CO₂ increase experiment)

7 ISO 的时-空谱结构及其传播

由于空间-时间功率谱分析能够区分波动能量的向东和向西传播能量^[18], 是确定环绕纬圈尺度的 ISO 时、空特征的有效办法, 为目前许多的 ISO 研究工作所采用。本文对 200 hPa 纬向风做空间-时间功率谱计算, 是针对逐年的热带 (10°S—10°N 纬向平均) 整个纬圈的纬向风异常值进行的。纬向风的异常值通过扣除 20 a 平均的年循环得到, 这样可以预先去除季节循环和年际变化的功率谱分量。对某一固定时刻, 通过快速傅利叶变换对纬向风异常值

沿纬圈做空间的谐波分析, 再对空间傅利叶系数的时间序列进行空间功率谱分析而得到 200 hPa 纬向风的空间-时间功率谱, 最后求功率谱 20 a 的平均值 (图 8)。由图可以看到, ECMWF 再分析资料的结果反映出 ISO 以东传的纬向 1—2 波为主, 也有西传成分, 以 2—4 波为主, 但其能量值远远小于东传部分, 小于 30 d 的高频成分少。由于波数与频率完全相同且振幅也相等, 但移动方向相反 (即频率符号相反) 的两个波会形成驻波, 因此, 实际表现出来的东移或西移波的能量要比图中所示的能量小一些。前、后 20 a ISO 的传播基本没有变化, 最大的差别

就是后 20 a 纬向风的能量更集中于 1—3 波,而小于 30 d 的高频成分有加强的倾向,这在前面的功率谱分析中已经体现出来。

模拟结果跟实测资料的差别比较大,模式模拟

的 ISO 除了有纬向东传 1 波外,还有一个峰值位于 4 波,且小于 30 d 的高频成分也比观测资料大很多,而西传分量以 3 波为主,能量向波数大的振荡分散,正是因为模式模拟结果中包含有更多的纬向风的高

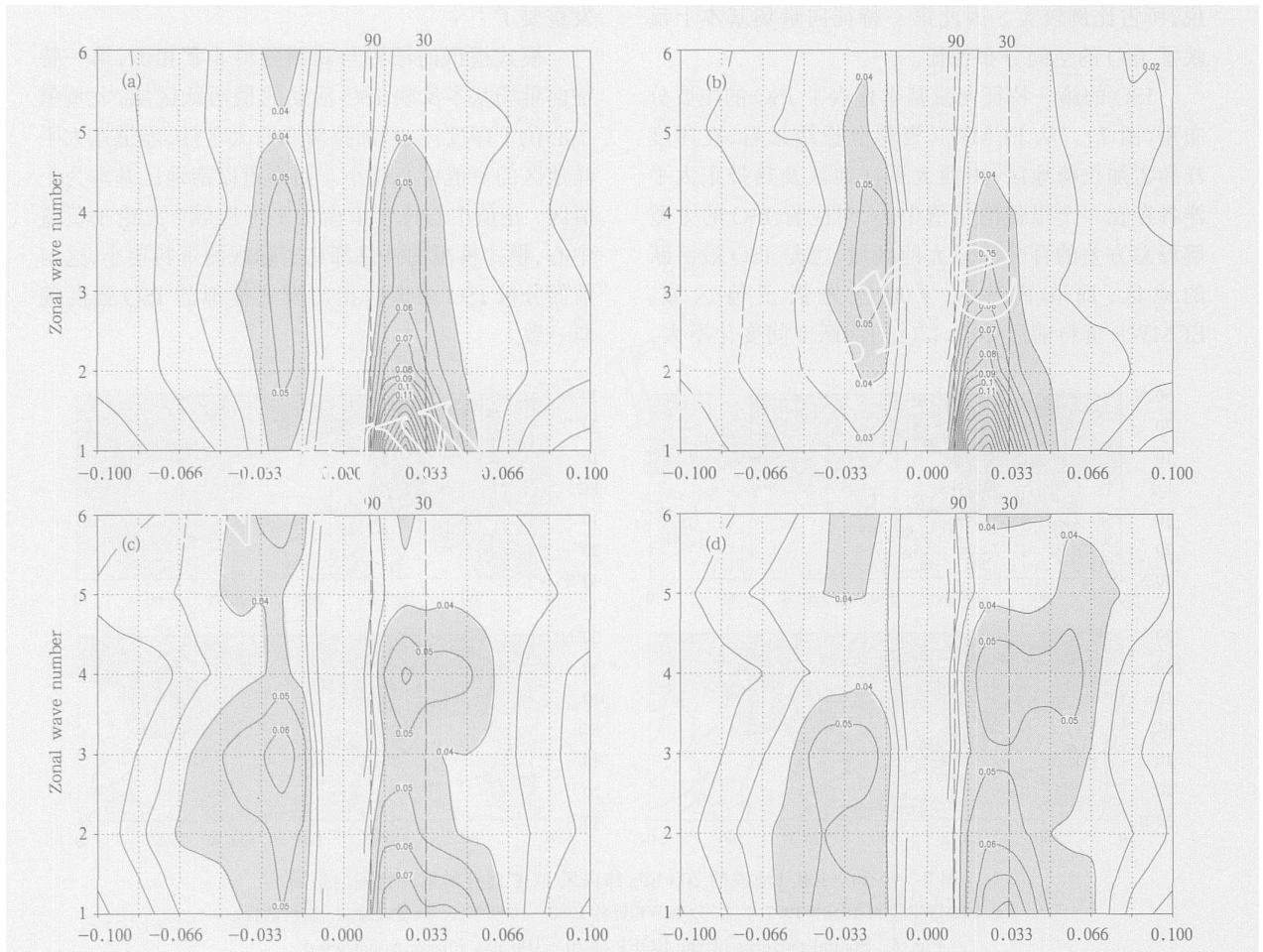


图 8 200 hPa 纬向风的空间-时间功率谱

(a. ECMWF 资料 1958—1977 年, b. ECMWF 资料 1980—1999 年, c. 控制试验 2051—2070 年, d. 加倍试验 2051—2070 年; 横坐标的正、负值分别表示向东和西传播的波频率, 纵坐标表示空间的纬向波数。纵虚线表示 30—90 d 的周期范围, 阴影区为能量值超过 0.04 的区域)

Fig. 8 The space-time power spectra of 200 hPa zonal wind

(a. ECMWF data for 1958 - 1977; b. ECMWF data for 1980 - 1999; c. control experiment from 2051 - 2070; d. CO₂ increase experiment from 2051 - 2070. The positive (negative) value on the abscissa indicates the frequency of eastward (westward) propagating waves, and the value on the ordinate is the zonal wave number. Two vertical dashed lines mark the range of the 30 - 90 day period, and the power spectra in excess of 0.04 are shaded)

频成分,能量分散,低估了 ISO 的活动强度,才使得模式对 ISO 整体的模拟不是很成功。加倍试验结果比控制试验的包含有更多的小于 30 d 的高频成分,这与实际观测结果一致,反映出在全球变暖的背景下,ISO 的频率有加大的趋势。

8 结 论

本文利用 ECMWF 再分析逐日资料分析季节内振荡 (ISO) 的时空特征。选取 1958—1977 和 1980—1999 年,前 20 a 为相对冷期,后 20 a 为全球

增暖期,对比分析全球变暖背景下前后 20 年 ISO 的特征及其变化;同时对比分析了 LASG 发展的耦合气候系统模式 FGOALS-1.0-g 工业革命前控制试验和大气中 CO₂ 浓度加倍试验结果,检验了该耦合气候系统模式对 ISO 的模拟能力,并初步分析了由 CO₂ 浓度增加所导致的全球变暖对 ISO 的影响。研究表明:

(1) FGOALS-1.0-g 模式基本真实地再现了 11 月—次年 3 月的气候背景场,这是正确反映 ISO 信号的重要的先决条件。

(2) 发现全球变暖背景下,ISO 的强度变化幅度加大,表明 ISO 更加活跃,且季节变化明显,冬、春季强,夏、秋季弱;而耦合模式却没能很好地模拟出 ISO 的季节变化,且模式模拟结果低估了 ISO 的强度。这表明,ISO 的模拟成功与否,还依赖于模式刻画各种时间尺度运动的总体能力的提高。

(3) 全球变暖背景下,随着温度的升高,原来在赤道中太平洋上活跃的 ISO 减弱,而在中印度洋、孟加拉湾地区变得活跃。耦合模式的全球增暖试验也反映了这一特点,虽然在强度上要比实际弱许多。此外,通过对比前后两个 20 年模拟和观测的 200 hPa 纬向风 EOF 分析的第一特征向量,可以进一步证实 ISO 在中印度洋、孟加拉湾地区变得活跃这一现象。

(4) 时-空谱分析表明,观测的 ISO 以东传 1—2 波为主,也有西传分量,以 2—4 波为主,能量小;后 20 a 中,对流层上层的纬向风能量更集中于 1—3 波,而小于 30 d 的高频成分有加强的倾向。模式结果与实测资料差别较大,因为模式模拟结果中包含有更多的纬向风的高频成分。加倍试验结果比控制试验的包含有更多的小于 30 d 的高频成分,这与实际观测结果一致,也反映出在全球变暖背景下,ISO 的频率有加大的趋势。

致谢:感谢中国气象局国家气候中心的董敏研究员及 LASG 李薇和周文博士对本文的宝贵意见。本文的主要计算工作是在中国科学院超级计算机深腾 6800 高性能计算机和中国科学院大气物理研究所科学计算和信息中心的 IBM690 高性能计算机上完成的。

参考文献

- [1] Madden R A, Julian P R. Description of a 40 - 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 702-708
- [2] 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
- [3] Murakami T, et al. On the 40 - 50 day oscillation during 1979 northern hemisphere summer, Part I: phase propagation. *J Meteor Soc Japan*, 1984, 62: 440-468
- [4] Lau K M, et al. Aspects of the 40 - 50 day oscillation during the northern winter as inferred from outgoing longwave radiation. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 1354-1367
- [5] Lau N C, et al. The structure and propagation of 40 - 50 day oscillation appearing in a GFDL general circulation model. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 2023-2047
- [6] Knutson T R, et al. 30 - 60 day atmospheric oscillation: composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1407-1436
- [7] 何金海. 热带准 40 天振荡的现象、成因及热带外环流的遥相关. *地球科学进展*, 1992, 7(4): 91-92
He Jinhai. The teleconnection between the phenomenon and feature of tropical quasi-40 oscillation and the circulation in extratropical. *Adv Earth Sci (in Chinese)*, 1992, 7(4): 91-92
- [8] Salby M L, Hendon H H. Intraseasonal behavior of clouds, temperature and motion in the tropics. *J Atmos Sci*, 1994, 51(15): 2207-2225
- [9] Zhang Chidong. Atmospheric intraseasonal variability at the surface in the tropical western Pacific Ocean. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 739-758
- [10] Madden R A. Seasonal variation of the 40 - 50 day oscillation in the tropics. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 3138-3135
- [11] Madden R A, Julian P R. Observations of the 40 - 50 day tropical oscillation — a review. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 814-837
- [12] 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 Meteor Sinica (in Chinese)*, 1994, 52(3): 261-273
- [13] 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*. Beijing: Advanced Education Press, 2000. 341pp
- [14] IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Science of Climate Change*, Contribution of Working Group I to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton L T, et al. (eds.), New York, Cambridge University Press, 881pp
- [15] Wang Bin. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J Climate*, 1995, 8(2): 267-285
- [16] 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 surface heat source over the Qinghai-Tibetan Plateau and its relation of

- precipitation in China. *Science in China (in Chinese)*, 2001, 31 (4): 327-332
- [17] 李峰, 何金海. 东亚夏季风与太平洋 SSTA 关系的年代际变化及其机制研究. *南京气象学院学报*, 2001, 24(2): 199-206
Li Feng, He Jinhai. Study on interdecadal relation features of north Pacific SSTA with east Asian summer monsoon as well as its mechanism. *J Nanjing Institute of Meteor (in Chinese)*, 2001, 24(2): 199-206
- [18] 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 Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(6): 821-830
- [19] Slingo J M, et al. Intraseasonal oscillation in 15 atmospheric general circulation models: results from an AMIP subject. *Climate Dyn*, 1996, 12: 325-357
- [20] 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
- [21] Sperber K R. Madden-Julian variability in NCAR CAM2.0 and CCSM2.0. *Climate Dynamics*, 2004, 23: 259-278
- [22] Gibson J K, Kallberg P, Uppala S. The ECMWF ReAnalysis (ERA) Project. *ECMWF News 1*, 1996, 73: 7-17
- [23] Gibson J K, Kallberg P, Uppala S, et al. ECMWF ReAnalysis Project Rep. Ser. 1, ECMWF, Shinfield Park, Reading. United Kingdom, 1997: 72pp
- [24] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001. 458pp
Wang Shaowu. *Advance in modern climatological studies*. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 458pp
- [25] 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
- [26] 刘海龙, 张学洪, 俞永强等. LASG IAP 气候海洋模式 LICOM 用户手册. 北京: 科学出版社, 2004. 108pp
Liu Hailong, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, et al. *Manual for LASG IAP Climate System Ocean Model*. Beijing: Science Press, 2004. 108pp
- [27] Wang Bin, Wan Hui, Ji Zongzhen, et al. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Sci in China, Series A*, 2004, 47 (Supp): 4-21
- [28] Bitz C M, Holland M M, Eby M, et al. Simulating the ice-thickness distribution in a coupled climate model. *J Geophys Res*, 2001, 106: 2441-2463
- [29] Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. A flexible global coupled climate model. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19: 169-190
- [30] Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, Guo Yufu. Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in LASG IAP. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 444-455

CHARACTERISTICS AND NUMERICAL SIMULATION OF THE TROPICAL INTRASEASONAL OSCILLATIONS UNDER GLOBAL WARMING

Liu Yunyun^{1,2} Yu Yongqiang² He Jinhai¹ Zhang Zhenguo³

1 *Department of Atmospheric Science, NUIST, Nanjing 210044*

2 *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029*

3 *Xinghua Meteorological Bureau, Xinghua 225700*

Abstract

Using the ECMWF reanalysis daily 200 hPa wind data in the two 20-year periods from 1958 to 1977 and 1980 to 1999, the characteristics and changes of Intraseasonal Oscillations (ISO) in the two periods associated with the global warming are analyzed and compared in this study. It is found that during the last 20 years, the ISO has weakened in the central equatorial Pacific Ocean, but become more active in the central Indian Ocean and the Bay of Bengal; under the background of the global warming, increase in the amplitude of ISO intensity suggests that the ISO has become more active than before, with an obvious seasonal cycle, i. e. strong in winter and spring, but weak in summer and autumn; the energy of the upper tropospheric zonal winds has more concentrated in the wave numbers 1 - 3, and the frequency of ISO tended to increase.

Comparison of the results of the control experiment and CO₂ increase (1% per year) experiment of FGOALS-1.0-g (developed at LASG) with the first and second 20-year observations, is also performed, respectively. The comparative results show that the spatial structure of the ISO was well reproduced, but the strength of ISO underestimated. On the basis of space-time spectral analysis, it is found that the simulated ISO contains too much high frequency waves, leading to the underestimation of ISO intensity due to the distraction of ISO energy. However, the FGOALS-1.0-g captured the salient features of ISO under the global warming background by two contrast experiments, such as the vitality and frequency-increasing of ISO in the central Indian Ocean and the Bay of Bengal.

Key words: Global warming, Tropical intraseasonal oscillation (ISO), Coupled general circulation model (CGCM).