

热带季节内振荡模拟研究的若干进展

董敏¹ 李崇银²

1 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘 要 大气季节内振荡 (ISO) 在长期天气和气候变化中有重要作用, 它是 20 世纪 70~80 年代以来大气科学领域的重要研究课题。本文简要介绍近年来季节内振荡的数值模拟研究的成果和进展, 包括数值模式模拟季节内振荡能力的进展; 模式模拟 ISO 能力对模式中对流参数化方案的敏感性; ISO 模拟结果与基本态的关系; 外强迫对模拟结果的影响; ENSO 与 ISO 关系的模拟研究, 以及全球变暖对 ISO 影响的模拟研究等。最后, 对今后的研究工作提出了一些建议。

关键词 季节内振荡 模拟研究 进展

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1113-10

中图分类号 P463

文献标识码 A

Some Progress in the Simulation Study of the Intraseasonal Oscillation of the Tropical Atmosphere

DONG Min¹ and LI Chong-Yin²

1 National Climate Center, Laboratory for Climate Study, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract Atmospheric intraseasonal oscillation (ISO) is very important in the long-range weather and climate variation. It is a popular research topic since the 1970s. In this paper some new progress and achievement in the simulation study of the ISO are introduced. These include the advances of the ability of general circulation models (GCMs) in simulating the ISO, the sensitivity of the simulation ability of GCMs to the convection parameterization scheme, the relation between the ISO simulation results and the mean state, the effects of external forcing on the ISO simulation, the simulation study of the relation between the ISO and ENSO, the simulation study of the influences of global warming on the ISO and so on. Finally some suggestions on the simulation study of the ISO are proposed.

Key words intraseasonal oscillation, simulation study, some progress

1 引言

热带地区季节内振荡 (30~60 天振荡, Intraseasonal Oscillation, 简称 ISO) 是 Madden 和 Julian^[1]在 1971 年发现的 (因此也简称为 MJO)。它是热带地区大气最强的振荡信号。它的活动及异常对热带气候系统有重要的影响。自从大气季节内

振荡 (ISO) 被发现以来, 一直受到各国气象学家的广泛重视。热带季节内振荡的研究之所以吸引了大批气象和海洋学家, 是与它的重要意义有关的。这表现在以下一些方面:

(1) 季节内振荡是大气中最显著的一种振荡现象, 是气候变率的重要分量, 它也是从短期天气变化到季节变化、年际变化、年代际变化整个大气多

尺度振荡链条中的重要一环。

(2) 季节内振荡是影响各地天气气候的极其重要的系统。热带季节内振荡 (ISO) 影响很多地方的降水变化, 例如亚洲季风区、热带太平洋岛屿^[2]、澳大利亚^[3]、北美西岸^[4]、南美^[5]以及非洲等地^[6]。副热带地区, 甚至中纬度地区的降水与旱涝也受相应的季节内振荡的影响^[7, 8]。

(3) 热带季节内振荡对热带气旋(台风)的生成有明显的调制作用, ISO 处于西风阶段时有利热带气旋的生成, 而 ISO 为东风阶段时会抑制热带气旋的生成和发展。因此, 它必然会影响到西太平洋沿岸(尤其是我国东南沿海)及美洲东南沿岸及加勒比海地区天气^[9, 10]。

(4) 热带季节内振荡会影响到热带地区的表面风场和大气对海洋的风应力, 进而影响到海洋的变化, 因此它可能对 ENSO 现象有影响^[11, 12]。当然, 热带海洋的温度变化对季节内振荡也有作用, 因此两者的相互作用对全球的天气气候变化是十分重要的。

(5) 热带季节内振荡是大尺度环流与对流活动相耦合的振荡, 而热带对流是大气的重要热源之一。因此它对全球的环流变化就有决定性的作用。

20 世纪 70 年代以后, 国内外对热带低频振荡都作了广泛的研究, 包括观测事实的研究, 它对天气气候影响的研究、低频振荡的数值模拟以及低频振荡发生机制的理论研究。李崇银^[13]和 Zhang^[14]分别对最近的研究进展作了较为全面的评述。

应该指出, 大气 ISO 的活动及其影响等还有不少问题有待深入研究, 尤其是大气 ISO 的数值模拟研究更引起国际上的广泛重视。因为一些数值天气预报结果清楚地表明, 模式对大气 ISO 的描写(预报)如何, 对其模拟能力及预报效果有十分重要的影响。

本文拟较系统地回顾季节内振荡模拟研究的历史及近年来的进展, 对研究中的一些热点问题发表评论, 对目前仍存在的问题及今后研究工作的开展提出一些建议。

2 GCM 模式对热带季节内振荡的模拟能力

由于大气环流模式 (GCM) 的发展到 20 世纪

70 年代末才逐渐完善, 使用大气环流模式对大气季节内振荡进行数值模拟研究也开展得相对较晚。早期的研究工作, 如 Hayashi 等^[15]和 Lau 等^[16]模拟出了环流和降水的东移信号, 但是这种东移振荡的速度太快, 它们更像 Kelvin 波而不是季节内振荡。随着模式的不断改进和计算技术的发展, 模拟的结果有了不断的改进, 也使我们进一步理解了很多问题。Slingo 等^[17]考察了大气环流模式比较计划 (AMIP) 中 15 个大气模式的模拟结果。发现只有少数模式能较好地模拟出热带大气 ISO。其结果还表明, 模式模拟季节内振荡的能力与模式采用的积云对流参数化方案有很大的关系, 海气相互作用的处理可能是另一个主要问题。同时还认为, 能够较好地模拟出环流(风场、降水、湿度场)基本状态的模式也能较好地模拟出季节内振荡。模式存在的主要问题是: 模拟的振幅比实际弱, 相速度比实际快, 30~60 天振荡的季节变化也与实际的变化不符。实际观测的 30~60 天振荡的要素分布图中, 对流活动区位于底层的西风带中或在西风带东侧与东风交界的辐合区, 但在很多模式模拟的结果中对流活动区却位于东风带。上述不足表明我们对热带低频振荡的发生机制的理解还不够正确。

尽管正确模拟热带季节内振荡是一个非常困难的问题, 但是近年来也出现一些模式在模拟季节内振荡方面取得明显的进步。Zhang 等^[18]考察了四个模式研究或数值预报中心的大气环流模式和耦合的大气海洋环流模式模拟季节内振荡现象的结果, 表明有些模式(例如德国的 MPI 模式)能较好地模拟出东移的行星尺度的波动, 它的能量明显地大于西移波的能量, 并且季节内振荡的谱与更低频的振荡能够分开。Dong 等^①在分析采用了新的 Zhang-McFarlane 对流参数化方案^[19]的 NCAR CAM3^[20]模式(简记为 CAM3Z)模拟的季节内振荡, 发现该模式在模拟热带季节内振荡方面取得了令人鼓舞的结果。图 1 给出该模式模拟的 850 hPa 纬向风的谱结构与 NCEP 及原 CAM3 结果的对比。该谱图是这样计算的: 取每一年、每一个纬圈上所有经度上的 U 值所组成的资料矩阵, 它的维数为纬圈上的经度数 [128 (模式格点) 或 144 (观测的 NCEP 资料的

① Dong M, Wu T, Zhang G. Simulations of tropical intraseasonal oscillation by CAM3 with a new convection scheme. Submitted to *Advances in Atmospheric Sciences*

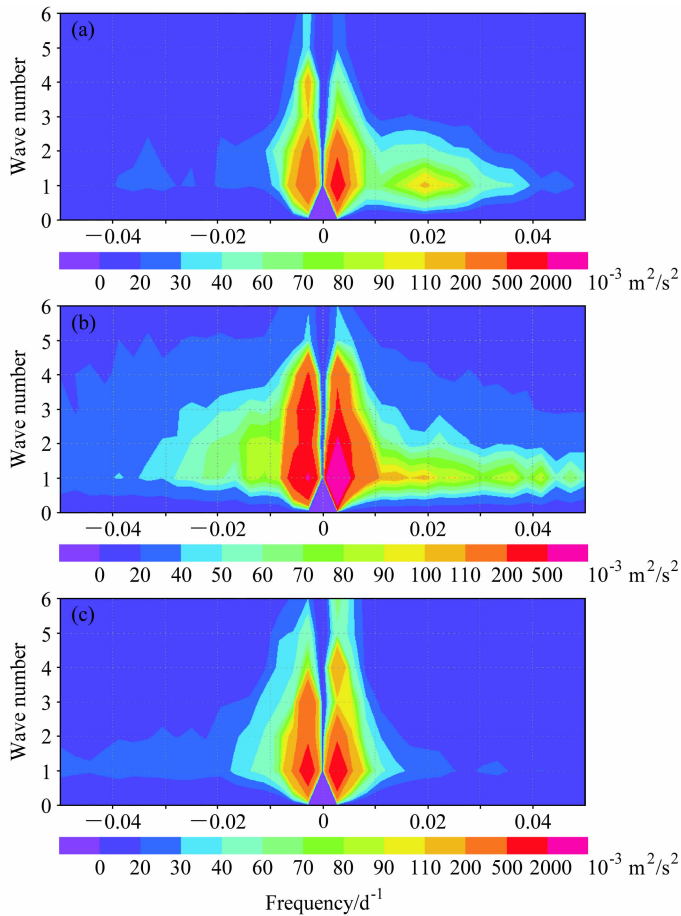


图 1 NCEP 资料 (a)、CAM3Z 模式 (b) 及原 CAM3 模式 (c) 的 850 hPa 纬向风的气候平均的时空谱

Fig. 1 The temporal and spatial power spectrums of zonal wind at 850 hPa from (a) NCEP data, (b) CAM3Z model and (c) the original CAM3 model

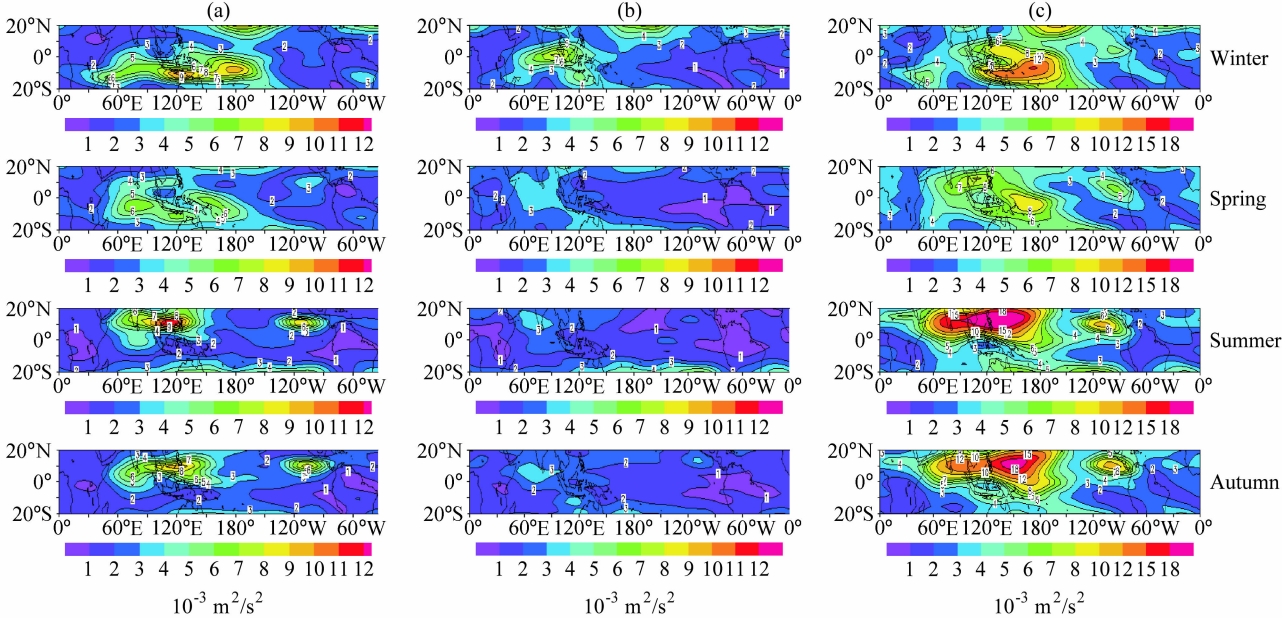


图 2 NCEP 资料 (a)、原 CAM3 模式 (b) 及 CAM3Z 模式 (c) 的 850 hPa 纬向风的季节内振荡分量的方差在四季的分布

Fig. 2 The variance distribution of the intraseasonal component of the zonal wind at 850 hPa in four seasons from (a) NCEP data, (b) the original CAM3 and (c) CAM3Z model

格点)] 乘以天数 (365)。先在纬圈方向上作傅里叶变换, 得到空间傅氏系数, 然后对时间作傅里叶变换即得到二维的时空傅里叶系数。其平方即为时空谱的能量。将所得的结果在 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 之间平均然后再对年份平均, 最后得到热带地区 850 hPa 纬向风的气候平均的时空谱。图 1 中的横坐标为频率, 正值代表东移波, 负值代表西移波。纵坐标为空间波数。图 1 中的色块代表每一个波数, 每一个频率的波所对应的谱能量。从图 1 可以看出 CAM3Z 模式模拟的结果在空间 1 波, 频率 0.01~0.04 (周期 20~100 天) 的范围内有较强的能量, 与观测实际 (NCEP) 的谱结构相当接近。

另一个模拟能力的明显进步是, 模拟的季节内振荡已经表现出与实际有些类似的空间地理分布和年内的季节变化。图 2 给出了用 NCEP 资料、原 NCAR CAM3 模式及 CAM3Z 模式模拟的 850 hPa 纬向风季节内振荡的方差在一年四季的变化。该图的做法是: 应用观测和模式输出的候平均资料, 对其进行时空谱分解之后, 取空间 1~5 波, 时间周期为 20~90 天的波动, 利用傅里叶逆变换重新合成一个时空序列。在空间点上计算时间变化的方差。我们就得到热带季节内振荡方差的地理分布情况。由图 2 可以看出 CAM3Z 模式可以基本上模拟出印度洋到西太平洋上季节内振荡随季节的变化南北移动的情况, 只是模拟的变化幅度比实际要大, 尤其是夏季东南亚的季节内振荡要明显地强于观测。

吴统文等^①应用国家气候中心 (NCC) 模式对其模拟热带低频振荡的能力也作了类似的验证。结果也表明具有较好的模拟能力。

3 热带季节内振荡对于对流加热的敏感性

对 ISO 的模拟研究, 一个主要目的是揭示其特征、规律及发生机理。积云对流加热反馈被最先认为是热带大气 ISO 的重要机制, 李崇银^[21]首先指出热带大气中的一些周期变化同 CISK (第二类条件性不稳定) 有关。为了对南亚季风槽脊 30~50

天振荡给予理论解释, 李崇银^[22]首先把 CISK 机制引入到 30~60 天振荡的研究, 认为移动性 CISK 波是驱动南亚季风槽 30~50 天振荡的机制。Lau 等^[23]基于同样的波动-CISK 理论, 进一步研究了热带 30~60 天振荡的积云对流反馈机制, 把热带大气的 30~60 天振荡的产生归因于活动性波动-CISK。这一理论能较好地解释了 30~60 天振荡的缓慢东传现象。Takahashi^[24]和 Chang 等^[25]对 Lau 的理论^[23]作了进一步的研究。由于热带大气中的 30~60 天振荡不只有东传, 也有西移的状况, 同时它们的活动有明显的二维 Rossby 波列的特征。这些都难以用 CISK-Kelvin 波来解释, Li^[26]提出了另一种重要机制, 即 CISK-Rossby 波来解释。这种由积云对流加热产生的 CISK-Rossby 波与经典的热带 Rossby 波不同, 它既可以西移, 也可以向东传播。Neelin 等^[27]和 Emanuel^[28]提出了摩擦-风反馈理论来解释 MJO 的机制。认为, 对流加热的变化是正比于蒸发的变化的。在地面基本气流为东风的条件下, 与 Kelvin 波相联系的地表风的偏差在对流区东侧为正, 而西侧为负。这进一步导致东侧比西部有更强的凝结加热发生。这引起波动的增大和东传。有关大气 ISO 的结构特征、移动规律、时间变化, 以及大气 ISO 的动力学机制等在李崇银^[29]的《大气低频振荡》一书中有系统的讨论。在陈隆勋等^[30]的《东亚季风》一书中也论及到一些有关问题。

无论是波动-CISK 理论还是摩擦-风反馈理论都与对流加热的作用有关。因此, 热带季节内振荡必然与对流加热过程有关。很多模拟研究揭示了季节内振荡的模拟好坏和模式的对流参数化有关。例如, Slingo 等^[17]的工作就指出了这一点。

Maloney 等^[31]将三种对流参数化方案分别放在同一大气模式中, 比较其模拟的季节内振荡, 发现模拟季节内振荡的结果有显著不同。说明模式模拟季节内振荡现象的能力对于对流参数化方案是非常敏感的。Wang 等^[32]采用改变对流参数化方案中水汽凝结阈值的方法改善了对 MJO 的模拟。Dong 等^②对比了 NCAR_CAM3 模式采用 Zhang-Mcfarlane 的对流参数化方案^[33]和修改的 Zhang-Mcfar-

① 吴统文, 董敏, 王在志, 等. 国家气候中心模式对季节内振荡的模拟. 投送气象学报

② Dong M, Wu T, Zhang G. Simulations of tropical intraseasonal oscillation by CAM3 with a new convection scheme. Submitted to *Advances in Atmospheric Sciences*

lane 对流参数化方案^[19]两种不同的参数化方案分别模拟的热带季节内振荡,发现改进的对流参数化方案不仅改进了降水的模拟,而且大大地改进了热带季节内振荡的模拟效果。其结果如图 1 和图 2 所示。贾小龙等^[34]的最新研究工作进一步深入探讨了对流过程影响季节内振荡现象的机制,通过改变对流产生的潜热加热的垂直分布的办法研究了潜热加热廓线对季节内振荡的影响,指出:当主要加热在对流层中、下部时,有利于产生东移的波动,而当加热在高层时,则波动西移。此外,在对流方案中是否包含动量输送也对季节内振荡现象的模拟有影响,当关闭对流方案中的动量垂直输送机制时,有利于季节内振荡现象的振幅增强。这些研究成果,增进了我们对于热带季节内振荡发生机制的认识。

4 模式分辨率的影响

模式的分辨率对其模拟热带季节内振荡能力的影响是有不同看法的。Slingo^[17]分析了 15 个模式的模拟结果发现,较高的水平分辨率(T42 或以上)与低分辨率的模式中的季节内振荡活动并无太大的差异。但 Inness 等^[35]则认为,当垂直分辨率提高后,季节内振荡的模拟得到了明显的改善。这可能是由于垂直分辨率的提高使得潜热加热和增湿计算更合理。这与贾小龙等^[34]的最新研究工作是一致的。

出于认为高分辨率可以改善季节内振荡的模拟能力的想法,现在已经有人使用区域中尺度模式甚至云可辨模式来模拟季节内振荡。Gustafson 等^[36]使用区域模式但在不使用有季节内振荡扰动的侧边界条件下的情况下模拟出了季节内振荡。但是,目前仍需要更多的实验才能确定这种区域模式模拟的热带季节内振荡是否比粗网格的全球模式模拟的结果更好。

5 模式平均气候态的作用

比较不同的大气环流模式模拟的季节内振荡的状况发现,如果模式能够较好地模拟出基本气候态,包括季节变化、降水的合理分布等,则其模拟的季节内振荡的情况也较好^[17]。Hendon 等^[37]及 Kemball-Cook 等^[38]的工作还表明垂直风切变模拟得好坏以及低层纬向风模拟的好坏也对季节内振荡

模拟有明显影响。Inness 等^[39]应用海气耦合模式研究了基本状态对模式模拟季节内振荡的能力的影响,得到季节内振荡更容易出现在低层或地面为西风基本气流的情况下。这与 Zhang 等^[40]的诊断结果是相符合的。

数值预报的实践也显示,模式对大气 ISO 的描写(预报)如何,对预报效果有十分重要的影响。这从反面证明了基本状态模拟与季节内振荡的模拟之间的关系。Hendon 等^[37]对 5 个动力延伸预报的分析表明,无论对三天还是十几天的预报,大气 ISO 的预报误差对整个预报起着重要作用。这表明大气 ISO 是大气环流的一个主要模态,它的存在相当于大气中存在一种内部强迫因子,尤其是在热带大气中加上了一个散度场强迫。Jones 等^[41]的分析也表明,动力延伸预报的主要误差来自模式所得到的热带大气 ISO 比较弱,而且东传过快。

李崇银等^[42]利用 2 个大气环流模式(SAMIL2 R42L9 和 CAM2)作了 12 年数值模拟,将结果同 NCAR/ NCEP 再分析资料进行对比分析,表明大气季节内振荡的模拟效果在天气和气候的数值模拟中有极为重要的作用。2 个大气环流模式对大气季节内振荡的模拟均方根误差(无论是 500 hPa 高度场还是 850 hPa 风场)都为整个模拟均方根误差的 30%~40%,两个大气环流模式对大气季节内振荡模拟均方根误差的空间分布形势与整个模拟均方根误差的空间分布形势十分类似。这也说明了模拟季节内振荡的能力好坏与模拟基本气候态的能力是一致的。

6 海洋作用的影响

很多工作^[39, 43, 44]都指出海气耦合模式能更好地模拟出季节内振荡。图 3 给出 CAM2 模式分别在气候平均海温驱动下及在与简化的海洋模式(Slab Ocean Model)相耦合时所模拟的风场和降水场的时空谱。显然,在海气耦合的条件下所模拟的季节内振荡更强,而且东移波更明显。但是也有一些研究的结果与上述的结论不同,认为海气耦合对模式模拟季节内振荡的能力改进很小^[45],没有影响,甚至变坏^[46, 47]。针对上述分歧,董敏等^[44]分别用固定海温、12 个月的气候海温、既有季节变化又有年际变化的实测月平均海温等作为下边界条件来驱动模式模拟季节内振荡,并与海气耦合模拟的结

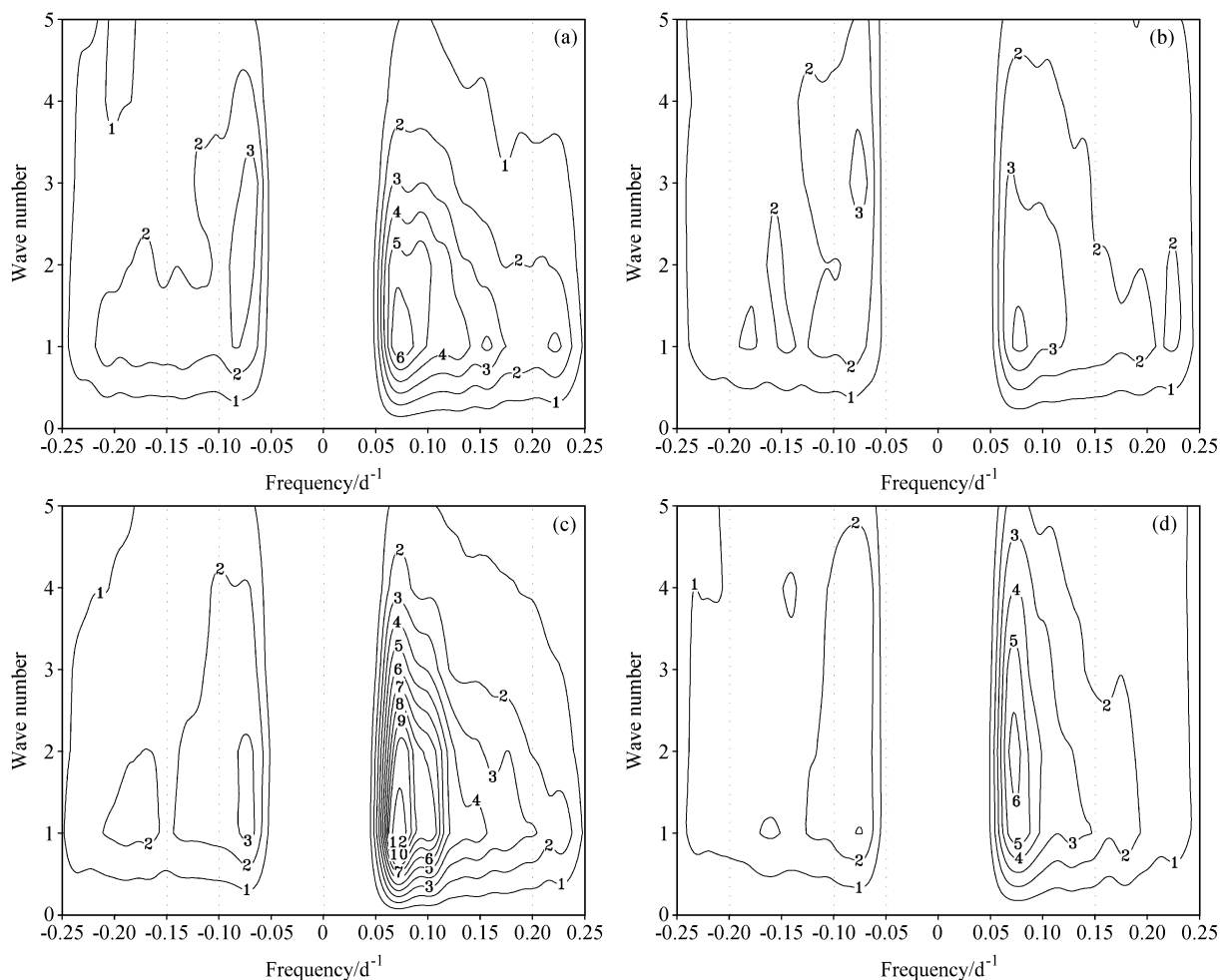


图3 CAM2 模式在气候海温驱动下运行 (a、b) 和与简化的海洋模式耦合运行时 (c、d) 850 hPa 纬向风 (a、c, 单位: $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$) 与降水 (b、d, 单位: $10^{-3} \text{ mm}^2/\text{d}^2$) 滤波后的时空谱

Fig. 3 The temporal and spatial power spectrums of zonal wind at 850 hPa (a, c, units: $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$) and precipitation (b, d, units: $10^{-3} \text{ mm}^2/\text{d}^2$) from the CAM2 model driven by climate SST (a, b) and the model coupled with a slab ocean model (c, d)

果进行比较。结果发现,在固定海温的条件下可以模拟出相当接近观测实际的季节内振荡,因此认为季节内振荡是一种大气内部固有的振荡。而在给定气候海温或既有季节变化又有年际变化的实测月平均海温作为下边界条件时模拟结果变差。这是因为气候平均的月海温或是观测的月海温值,它具有至少 2 个月以上的振荡周期以及年周期、年际变化甚至更长的周期,这相当于给模式加了一个具有 60 天和更长周期的外强迫,因此使模式模拟季节内振荡的能力被削弱。而与海洋模式耦合时则不会有这样的问题。这时大气的季节内振荡是它与海洋组成的一个系统的内部振荡,而没有大气的固有振荡向固定的海洋外强迫适应的问题。

李薇等^[48]也作过用周海温与月海温驱动大气

模式模拟季节内振荡的试验,发现使用周海温作下边界条件时模拟的季节内振荡现象比用月海温时明显。上述研究成果都说明,季节内振荡现象与外强迫是有关系的,它是会受外强迫调制的。

7 ISO 与 ENSO 关系的模拟研究

热带大气的 ISO 对全球大气环流及气候有着重要影响,其与 ENSO 现象之间的关系也受到了科学家的广泛关注。人们对两者的内在联系非常感兴趣。国内外均有很多文章。例如,李崇银等^[11]、李桂龙等^[12]、龙振夏等^[49]、Lau 等^[50]、Kessler^[51]、Moore 等^[52],以及其他很多作者。

在 ISO 与 ENSO 关系的研究中,观测和理论分析方面的文章较多,模拟研究的文章较少。但在

国外已有一些模拟研究讨论 ISO 对 ENSO 现象的激发作用。Harrison 等^[53]在大气模式积分时加入预先给定的与 ISO 相连系的风场的距平, 积分结果则得到类似于 1982~1983 年 El Niño 事件的 SST 正距平。Latif 等^[54]应用耦合模式的研究结果表明, 大气在西太平洋地区持续一个月的西风事件可以产生 12 个月的海温异常的响应。Kessler 等^[55]、Perigaud 等^[56]、Lengaigne 等^[57]和 Boulanger 等^[58]的模拟研究均表明, 与 ISO 相联系的西风事件在促使 1997~1998 年 El Niño 事件爆发和增长方面有明显的作用。这些研究结果暗示, 如果模式能较好地模拟或预报 ISO, 那末它模拟或预报 ENSO 的能力也将会改进。

8 气候变化对季节内振荡影响的模拟

诊断研究表明, 季节内振荡也存在着年际变化^[59]。这种变化是否与气候的长期自然变化、外强迫的变化或人类活动有关? 最近, 这些问题已引起气象学家的注意。蒋国荣等^[60]、俞永强等^[61]和刘芸芸等^[62]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-1.0g, 对全球增暖背景下热带大气季节内振荡特征的变化进行模拟研究, 结果认为:

(1) 在工业革命前, CO_2 浓度为 280×10^{-6} 条件下模拟的季节内振荡强度存在明显的年际与年代际变化。模拟的热带大气 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, 春秋季节最明显。

模拟的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。

(2) 加倍试验(从工业革命前 280×10^{-6} 的 CO_2 浓度开始, 以每年 1% 等比增加到 560×10^{-6} 的试验)与控制试验模拟结果对比显示, 总体而言, 人类活动影响所导致的气候变暖对热带大气 ISO 主要活跃区的强度、范围变化影响不大, 但它改变了热带大气 ISO 强度的时间变化趋势; 结合自然变率下和 NCAR/NCEP 资料分析结果, 实际大气分析所得的偏暖阶段 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的关联可能不大。

(3) 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, 这与控制实验中纬向东传波(西传波)的能量基本维持一种平衡状态, 无上升或下降趋势明显不同, 表明人类活动影响所导致的气候变暖对热带大气 ISO 的传播特征有影响; 因此, 近六十年来纬向东传波(西传波)的能量增长(减少)趋势的结果可能是人类活动影响所致。

9 讨论及对今后研究的建议

尽管, 30 多年来的努力使我们在认识季节内振荡现象方面取得了很大进展, 在它的模拟研究方面取得了一些进步, 但也存在很多不足。鉴于季节内振荡在大气科学上的重要性和它在短期气候预测业务应用方面的潜力, 我们认为还应加强这方面的研究, 尤其是模拟研究。模拟研究的主要目的有两个, 一是发展改进模式, 通过对模拟结果的检验发现模式存在的问题, 并找出改进的线索; 二是研究季节内振荡的机制和各种尺度的变化(从年内的季节变化、年际变化到气候变化), 季节内振荡与其它环流系统的相互作用以及它与外强迫的关系等。由于资料的不足, 这些问题更适合于借助模拟的手段来解决。

由于季节内振荡的重要性, 在气候模式的发展中检验模式模拟季节内振荡的能力已经成了检验模式水平必不可少的项目。值得注意的是, 人们在发现模拟结果中存在大尺度、有季节内时间周期的东移信号时就认为模式能模拟出季节内振荡, 这是不够的。模式检验应与观测研究采用同样的标准进行, 这包括: 检验模拟结果的时空谱, 谱峰值是否在大尺度(1~5 波)、季节内(30~60 天, 或 20~90 天)的范围, 是否东移分量大于西移分量, 是否有接近实际的传播速度, 季节内振荡的环流分量与降水分量是否配合, 季节内振荡的空间分布是否与观测一致, 它的季节变化、年际变化、年代际变化乃至更长期的变化是否接近观测等等。

按照上述标准, 要改进现有模式的模拟能力, 并进一步应用模拟研究的方法研究季节内振荡的机

制以及和季节内振荡有关的问题, 我们还有很多工作要做:

(1) 首先, 对流加热与季节内振荡的关系有待进一步细化。

(2) 目前研究较多的是热带的季节内振荡, 对于副热带、中纬度的季节内振荡的研究, 无论从观测事实还是理论或模拟研究还很不充分。对于它们之间的相互作用也了解得很少, 这是需要加强的。

(3) 应给予经向传播的季节内振荡更多的注意, 它可能对我国的季节变化和旱涝异常有更直接的关系。

(4) 季节内振荡与其两端的各种时间尺度的变率之间的关系, 如季节内振荡是如何影响或控制短期天气变化的, 它与更长时间尺度的气候变率的关系, 如季节内振荡与 ENSO 的相互作用, 还需进一步研究。

(5) 在季节内振荡的研究中, 应更多地应用最新的探测资料, 尤其是卫星资料, 以便使模拟结果与之对比, 更充分地揭示季节内振荡现象的空间结构和时间变化规律。

参考文献 (References)

- [1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40 - 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28** (5): 702~708
- [2] Lau K-M, Chan P H. Aspects of the 40 - 50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing long-wave radiation. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 1354~1367
- [3] Hendon H H, Liebmann B. The intraseasonal (30 - 50 day) oscillation of the Australian summer monsoon. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 2909~2924
- [4] Jones C. Occurrence of extreme precipitation events in California and relationships with the Madden Julian oscillation. *J. Climate*, 2000, **13**: 3576~3587
- [5] Paegle J N, Byerle L A, Mo K C. Intraseasonal modulation of South American summer precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 837~850
- [6] Matthews A J. Intraseasonal variability over tropical Africa during northern summer. *J. Climate*, 2004, **17**: 2427~2440
- [7] 韩荣青, 李维京, 董敏. 北半球副热带-中纬度太平洋大气季节内振荡的纬向传播与东亚夏季旱涝. *气象学报*, 2006, **64** (2): 149~163
Han R Q, Li W J, Dong M. The impact of 30 - 60 day oscillations over the subtropical Pacific on the east Asian summer rainfall. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (2): 149~163
- [8] 周兵, 何金海, 徐海明. 青藏高原气象要素场低频特征及其与夏季区域降水的关系. *南京气象学院学报*. 2000, **23** (1): 93~100
Zhou B, He J H, Xu H M. LFO characteristics of meteorological elements over Tibetan plateau and the relations with summer rainfall. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2000, **23** (1): 93~100
- [9] Liebmann B, Hendon H, Glick J. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian oceans and the Madden-Julian oscillation. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 1994, **72**: 401~411
- [10] Higgins R W, Shi W. Intercomparison of the principal modes of interannual and intraseasonal variability of the North American monsoon system. *J. Climate*, 2001, **14**: 403~417
- [11] 李崇银, 周亚萍. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系, *地球物理学报*, 1994, **37** (1): 17~26
Li C Y, Zhou Y P. Relationship between intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere and ENSO. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 1994, **37** (1): 17~26
- [12] 李桂龙, 李崇银. 大气季节内振荡的活动与 El Nino. *热带气象学*, 1998, **14** (1): 54~62
Li G L, Li C Y. Activity of atmospheric intraseasonal oscillation and El Niño. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1998, **14** (1): 54~62
- [13] 李崇银. 大气季节内振荡研究的新进展. *自然科学进展*, 2004, **14** (7): 734~741
Li C Y. Advances in the intraseasonal oscillation of the atmosphere. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2004, **14** (7): 734~741
- [14] Zhang C. Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.*, 2005, **43**: RG2003, doi: 10. 1029/2004RG000158
- [15] Hayashi Y, Golder D G. Tropical intraseasonal oscillations appearing in a GFDL general circulation model and FGGE data. Part I: Phase propagation. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 3058~3067
- [16] Lau N-C, Lau K-M. The structure and propagation of intraseasonal oscillations appearing in a GFDL general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 2023~2047
- [17] Slingo J M, Sperber K R, Boyle J S, et al. Intraseasonal oscillations in 15 atmospheric general circulation models: Results from an AMIP diagnostic subproject. *Climate Dyn.*, 1996, **12** (5): 325~357
- [18] Zhang C, Dong M, Gualdi S, et al. Simulations of the Madden-Julian oscillation in four pairs of coupled and uncoupled global models. *Climate Dyn.*, 2006, **27** (6): 573~592, DOI 10. 1007/s00382-006-0148-2
- [19] Zhang G J, Mu M Q. Effects of modifications to the Zhang_McFarlane convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmosphere Research Community Climate Model, Version 3. *J.*

- Geophys. Res.*, 2005, **110**: D09109, doi: 10. 1029/2004JD005617
- [20] Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3. 0). NCAR Tech. Notes NCAR/TN-464+STR National Center for Atmosphere Research, Boulder, Colo. 2004. 214pp
- [21] 李崇银. 第二类条件不稳定——振荡型对流. 中国科学 (B), 1983, **26**: 857~865
- Li C Y. The conditional instability of second kind—Oscillational convection. *Scientia Sinica* (Ser. B) (in Chinese), 1983, **26**: 857~865
- [22] 李崇银. 南亚季风槽 (脊) 和热带气旋活动与移动性 CISK 波, 中国科学 (B), 1985, **28**: 668~675
- Li C Y. Actions of summer monsoon troughs (ridges) and tropical cyclones over south asia and the moving cisk mode. *Scientia Sinica* (Ser. B) (in Chinese), 1985, **28**: 668~675
- [23] Lau K-M, Peng L. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: Basic theory. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 950~972
- [24] Takahashi M. A theory of the slow phase speed of the intraseasonal oscillation using the wave-CISK. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **65**: 43~49
- [25] Chang C P, Lim H. Kelvin wave-CISK: A possible mechanism for the 30-50 day oscillations. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 1709~1720
- [26] 李崇银. 赤道以外热带大气中 30-50 天振荡的一个动力学研究. 大气科学, 1990, **14**: 83~92
- Li C Y. A dynamical study on the 30-50 day oscillation in the tropical atmosphere outside the equator. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1990, **14**: 83~92
- [27] Neelin J D, Held I M, Cook K H. Evaporation-wind feedback and low-frequency variability in the tropical atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 2341~2348
- [28] Emanuel K A. An air-sea interaction model of intraseasonal oscillations in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 2324~2340
- [29] 李崇银. 大气低频振荡, 北京: 气象出版社, 1993
- Li C Y. *Low Frequency Oscillation* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993
- [30] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991
- Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al. *East Asia Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991
- [31] Maloney E D, Hartmann D L. The sensitivity of intraseasonal variability in the NCAR CCM3 to changes in convective parameterization. *J. Climate*, 2001, **14**: 2015~2034
- [32] Wang W, Schlesinger M E. The dependence on convection parameterization of the tropical intraseasonal oscillation simulated by the UIUC 11-layer atmospheric GCM. *J. Climate*, 1999, **12**: 1423~1457
- [33] Zhang G J, McFarlane N A. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model. *Atmos. Ocean*, 1995, **33**: 407~446
- [34] 贾小龙, 李崇银. 热带大气季节内振荡的数值模拟对积云对流参数化的敏感性. 气象学报, 2007, 待发表
- Jia X L, Li C Y. The sensitivity of the numerical simulation of tropical intraseasonal oscillation to cumulus convection parameterization. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2007, in press
- [35] Inness P M, Slingo J M, Woolnough S J, et al. Organization of tropical convection in a GCM with varying vertical resolution: Implications for the simulation of the Madden-Julian oscillation. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 777~793
- [36] Gustafson W I Jr, Weare B C. MM5 modeling of the Madden-Julian oscillation in the Indian and west Pacific oceans: Model description and control run results. *J. Climate*, 2004, **17**: 1320~1337
- [37] Hendon H H, Liebmann B, Newman M, et al. Medium-range forecasts errors associated with active episodes of the Madden-Julian oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 69~86
- [38] Kemball-Cook S, Wang B, Fu X. Simulation of the intraseasonal oscillation in the ECHAM-4 model: The impact of coupling with an ocean model. *J. Atmos. Sci.*, 2002, **59**: 1433~1453
- [39] Inness P M, Slingo J M, Guilyardi E, et al. Simulation of the Madden-Julian oscillation in a coupled general circulation model. Part II: The role of the basic state. *J. Climate*, 2003, **16**: 365~382
- [40] Zhang C D, Dong M. Seasonality of the Madden-Julian oscillation. *J. Climate*, 2004, **17**: 3169~3180
- [41] Jones C, Waliser D E, Schemm J K, et al. Predication skill of the Madden-Julian oscillation in dynamical extended range forecasts. *Climate Dyn.*, 2000, **16**: 273~289
- [42] 李崇银, 贾小龙, 董敏. 大气季节内振荡的数值模拟比较研究, 气象学报, 2006, **64** (4): 412~419
- Li C Y, Jia X L, Dong M. Numerical simulation and comparison study of the atmospheric intraseasonal oscillation. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese). 2006, **64** (4): 412~419
- [43] 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
- [44] 董敏, Zhang C D, 何金海. 外强迫对热带季节内振荡影响的模拟研究. 大气科学, 2006, **30** (3): 413~422
- Dong M, Zhang C D, He J H. A simulation study of the influence of external forcing on the tropical intraseasonal oscillation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chi-

- nese), 2006, **30** (3): 413~422
- [45] Maloney E D, Kiehl J T. MJO-related SST variations over the tropical eastern Pacific during Northern Hemisphere summer. *J. Climate*, 2002, **15**: 675~689
- [46] Hendon H H. Impact of air-sea coupling on the Madden-Julian oscillation in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.* 2000, **57**: 3939~3952
- [47] Liess S, Bengtsson L, Arpe K. The intraseasonal oscillation in ECHAM4 Part I: Coupled to a comprehensive ocean model. *Climate Dyn.*, 2004, **22**: 653~669, doi: 10. 1007/s00382-004-0406-0
- [48] 李薇, 宇如聪, 刘海龙. 大气模式中大气季节内振荡特征对不同海温强迫场的相应. 青岛海洋大学学报, 2002, **32** (1): 9~17
Li W, Yu R C, Liu H L. Response of Madden-Julian oscillation in the Community Climate Model to different SST forcings. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 2002, **32** (1): 9~17
- [49] 龙振夏, 李崇银. 热带低层大气 30~60 天低频动能的年际变化与 ENSO 循环. 大气科学, 2001, **25** (6): 798~808
Long Z X, Li C Y. Interannual variability of 30~60 day low-frequency kinetic energy in the lower tropical atmosphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (6): 798~808
- [50] Lau K-M, Shen S. On the dynamics of intraseasonal oscillations and ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 1781~1797
- [51] Kessler W S. EOF representations of the Madden-Julian oscillation and its connection with ENSO. *J. Climate*, 2001, **14**: 3055~3061
- [52] Moore A M, Kleeman R. Stochastic forcing of ENSO by the intraseasonal oscillation. *J. Climate*, 1999, **12**: 1199~1220
- [53] Harrison D E, Schopf P S. Kelvin-wave-induced anomalous advection and the onset of surface warming in El Niño events. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 923~933
- [54] Latif M, Biercamp J, von Storch H. The response of a coupled ocean-atmosphere general circulation model to wind bursts. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 964~979
- [55] Kessler W S, Kleeman R. Rectification of the Madden-Julian oscillation into the ENSO cycle. *J. Climate*, 2000, **15**: 3560~3575
- [56] Perigaud C M, Cassou C. Importance of oceanic decadal trends and westerly wind bursts for forecasting El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 389~392
- [57] Lengaigne M, Boulanger J P, Menkes C, et al. The March 1997 westerly wind event and the onset of the 1997/98 El Niño: Understanding the role of the atmospheric response. *J. Climate*, 2003, **16**: 3330~3343
- [58] Boulanger J P, Menkes C, Lengaigne M. Role of high-and low-frequency winds and wave reflection in the onset, growth and termination of the 1997~1998 El Niño. *Climate Dyn.*, 2004, **22**: 267~280, doi: 10. 1007/s00382-003-0383-8
- [59] 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 M, Zhang X Q, He J H. A diagnostic study on the temporal and spatial characteristics of the tropical intraseasonal oscillation. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 821~830
- [60] 蒋国荣, 俞永强, 何金海. 季节内振荡的数值模拟 I. 自然变率. 大气科学, 2007, **31** (3): 536~546
Jiang G R, Yu Y Q, He J H. Numerical simulation of the intraseasonal oscillation. Part I: Simulative natural variability. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (3): 536~546
- [61] 俞永强, 蒋国荣, 何金海. 大气季节内振荡的数值模拟 II. 全球变暖的影响. 大气科学, 2007, **31** (4): 577~585
Yu Y Q, Jiang G R, He J H. Numerical simulation of the intraseasonal oscillation. Part II: Impact of global warming. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (4): 577~585
- [62] 刘芸芸, 俞永强, 何金海, 等. 全球变暖背景下热带大气季节内振荡特征变化特征及数值模拟. 气象学报, 2006, **64** (6): 723~732
Liu Y Y, Yu Y Q, He J H. Characteristics and numerical simulation of the tropical intraseasonal oscillations under global warming. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (6): 723~732