

大气低频振荡的数值模拟

薛 峰 梁信忠 王万秋 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘 要 本文利用 IAP GCM 积分结果中 10 年候平均资料, 研究了模式大气中的低频振荡现象。结果表明, 该模式能相当逼真地模拟出低频振荡的地理分布、垂直结构和传播过程的主要特征, 因而低频振荡是大气本身所固有的一种现象。而流场与大气加热场之间在低频域内的相关分析则证实了大气加热对低频振荡的产生起重要的作用, 其中最重要的因子是水汽潜热的释放。

关键词 低频振荡 数值模拟

1 引言

Madden 和 Julian^[1]利用 Canton 岛的观测资料, 首先发现热带太平洋地区的风场和气压场存在 40~50 天的低频振荡现象 (以下简称为 LFO), 其后, 众多气象学家对这一现象进行了广泛而深入的研究^[2], 得到 LFO 的一些重要特征, 主要有: (1) LFO 发生在全球范围内, 其中尤以热带最为显著, 并有明显的区域分布特征; (2) LFO 无严格的周期, 其周期约为 10~90 天, 但倾向于 30~60 天占优势, 因而又称之为季内振荡或 30~60 天振荡; (3) 热带 LFO 主要为纬向 1 波的向东传播; (4) 热带 LFO 主要为斜压结构, 而中高纬主要为正压结构。

上述有关 LFO 的研究结果大都是根据观测分析得到的。Lau 等^[3](1986)利用 GFDL GCM 的模式输出结果, 从数值模拟的角度研究了模式大气中 LFO 的结构和传播, 证实了 GCM 可以较好地模拟出 LFO 的基本特征。本文利用 IAP GCM 25 年积分结果中的 10 年候平均资料来研究模式大气中的低频振荡现象。由于模式输出结果较观测资料完备, 且 GCM 中包含大气中各种复杂的物理过程, 与观测分析和简单的机制模式研究相比, 模拟结果分析有其独到的优越之处, 其结果亦便于和观测分析直接比较, 以验证模式对 LFO 的模拟能力。

2 低频振荡的地理分布

根据经典的功率谱分析方法, 我们提出如下的最大值指数(I_M)和面积指数(I_A)以表示 LFO 显著性的地理分布, 如图 1 所示, 实线为某一物理量的功率谱曲线, 虚线为对应的 95%置信度红噪声曲线, 则最大值指数定义为某一低频域内 (对应周期为 $T_1 \sim T_2$) 功率谱与红噪声谱之差的最大的正值, 而面积指数则定义为该频域内超过红噪

声以上的功率谱曲线下的面积(图中阴影区),如以 P 、 R 、 T 分别表示功率谱、红噪声谱和周期,则 I_M 和 I_A 可用公式表示为

$$I_M = \max[P(T) - R(T)], \quad T \in (T_1, T_2), \text{ 且 } P - R \geq 0$$

$$I_A = \int_{T_1}^{T_2} [P(T) - R(T)] dT, \quad T \in (T_1, T_2), \text{ 且 } P - R \geq 0$$

由图 1 可见,功率谱的谱峰越高,这时对应的 I_M 和 I_A 也越大,表示 LFO 的活动越显著,因而可以根据 I_M 或 I_A 的大小来判断 LFO 活动的显著性。

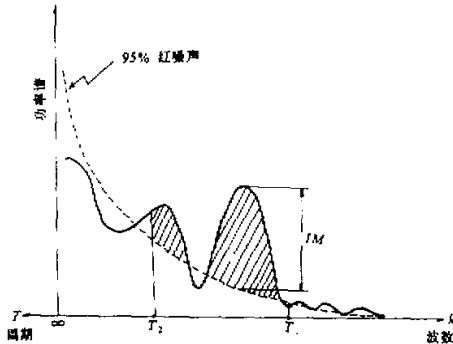


图 1 最大值指数与面积指数的示意图
阴影区表示面积指数

利用上述方法,求出全球每个格点的 I_M 和 I_A , 就可以得到 LFO 活动的全球分布图。若某格点在低频域内功率谱曲线在红噪声曲线以下,即 I_M 或 I_A 小于零,则令其为零(因为我们并不讨论 LFO 的不显著性)。由于观测分析表明, LFO 的优势周期为 30~60 天,故取 $T_1 = 30$ 天, $T_2 = 60$ 天。

根据模拟的 10 年候平均资料,得到各种物理量的最大值指数(I_M)和面积指数(I_A)分布图,图 2 即为表面纬向风的计算结果,为方便起见,图中等值线数值扩大 1000 倍。对比 I_M 和 I_A 的分布可知,二者几乎完全相同,因此我们将选用 I_A 来讨论 LFO 的活动情况。如图 2b 所示,赤道附近为 I_A 的最大值区,其中心位于印度洋、太平洋和大西洋,另外,中高纬度个别区域如大西洋和北太平洋等地也存在较为明显的高值区,但数值比赤道带要小,因而从全球范围来看,赤道带是 LFO 最显著的活动区,中高纬度个别区域也较显著。我们还注意到,海洋上的 LFO 活动远较大陆上显著。上述模拟结果与 Knutson 等^[4]的观测分析基本相同。进一步计算还表明,另外一些大气变量如温度、湿度的 I_A 分布也与纬向风基本相同。

有趣的是,大气加热场也存在类似的低频振荡现象。这里我们首先给出模式中有关大气热场计算公式,若以 B_a 表示加热场,则

$$B_a = N_0 - N_s + H_s + L P_r,$$

式中 N_0 为模式顶净向下辐射, $N_0 = S_0 - R_0$, S_0 为模式顶入射太阳辐射, R_0 为模式顶净向上长波辐射, N_s 为表面净向下辐射, $N_s = S_4 - R_4$, S_4 为表面吸收的太阳辐射, R_4 为表面净向上长波辐射, H_s 为表面感热通量, L 为水汽凝结潜热, P_r 为降水量。

如图 3 所示, B_a 面积指数分布与纬向风类似,即赤道附近为最大值区,中高纬度个别区域也存在 I_A 的高值区。与纬向风不同的是,热带大陆也存在较为明显的高值中心,因而加热场 LFO 活动的海陆差异不如流场明显。另外,大气加热场中的各个分量如长波辐射、降水的潜热加热等也有类似的低频振荡现象(图略)。已有的研究表

明^[2], 大气加热场尤其是积云对流反馈引起的潜热释放对热带 LFO 的产生起到重要作用, 而数值模拟结果则进一步揭示了其本身的低频振荡现象。

综上所述, 可见 IAP GCM 十分逼真地模拟出 LFO 全球地理分布的基本特征, 特别值得指出的是, LFO 活动最显著和海气相互作用最强的区域都在热带, 而在一个不

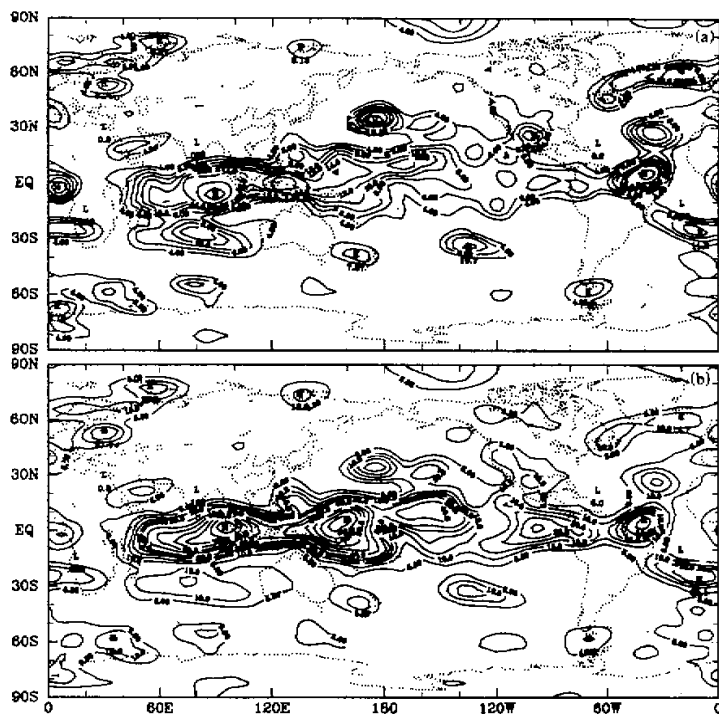


图 2 表面纬向风计算结果的地理分布

(a) 表面纬向风最大值指数, (b) 面积指数

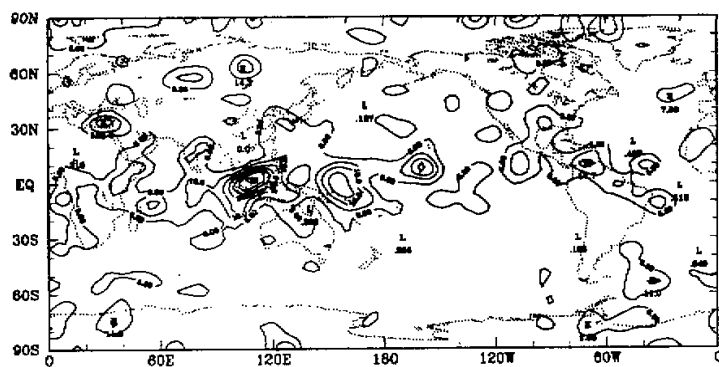


图 3 大气加热场面积指数的地理分布

作为与赤道带的对比, 图 5 给出北半球高纬度对应的剖面图。图中显示高纬 LFO 的传播与赤道带有很大不同, 一般呈现缓慢西传或准静止状态, 东传也可见到, 其传播速度明显小于赤道带, 且西传一般发生在冬半年, 而东传发生在夏半年, 这与李崇银^[2]的观测分析也基本相同。同赤道带类似, 高纬 LFO 传播的年际差异也很大。

4 低频振荡的机制探讨——大气流场与加热场的相关分析

一系列的研究表明^[2,5], 不同的物理因子如大气的非线性相互作用等都可以激发产生 LFO, 但在 LFO 最显著的区域特别是热带, 积云对流反馈产生的潜热加热则起到最关键的作用。这里我们采用相关分析的方法对 LFO 的产生机制作进一步的探讨。如上所述, 大气流场和加热场都呈现明显的低频振荡现象, 而且二者的分布特征十分相似, 因而它们有可能处于同一低频振荡系统中。由于 LFO 具有很明显的区域差异, 在讨论这个问题时适当分区是必要的。为了确定某区域流场和加热场是否处于同一低频振荡系统中, 我们认为必须满足如下两个基本条件: 其一, 该区域流场和加热场必须呈现显著的低频振荡, 其二, 流场和加热场在低频域内必须有显著的相关。

首先对模式的 10 年候平均 400 hPa 纬向风(u_{400})、800 hPa 纬向风(u_{800})以及大气加热场 B_a 作 30~60 天的带通滤波处理, 然后求出它们的同時相关场, 结果如图 6

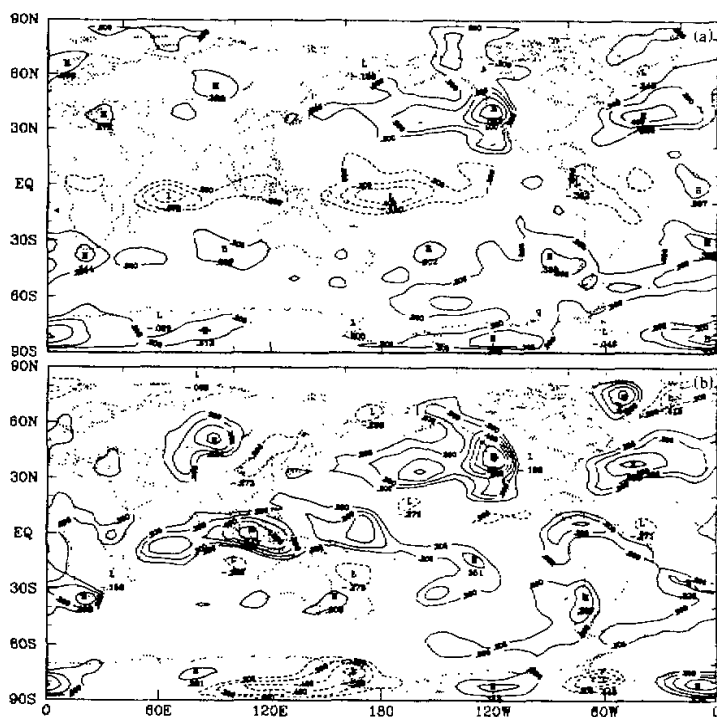


图 6 大气加热场与 u_{400} (a)、 u_{800} (b) 的相关场

所示。对 10 年的候平均资料, 其样本 $n=730$, 因此相关系数 $|r| \geq 0.1$ 即超过 99.9% 的置信水平。另外由于 IAP GCM 在垂直方向上只有两层, 我们分别以 400 hPa、800 hPa 代表大气高层和底层。

考察图 6 可见, 在热带地区, B_a 与 u_{400} 成显著的负相关, 与 u_{800} 则成显著的正相关, 但在中高纬度地区如北大西洋、北太平洋等地, B_a 与 u_{400} 和 u_{800} 均成显著的正相关, 这表明热带 LFO 呈明显的斜压结构, 而中高纬则为正压结构, 与观测结果颇为一致^[2], 因此, 虽然 IAP GCM 只有两层, 却相当逼真地再现了不同区域的垂直结构特征。

结合图 2、图 3 和图 6 可以看到, 在 LFO 最显著的区域如热带印度洋到西太平洋一带, B_a 与流场有较大的相关, 如 u_{800} 与 B_a 在印尼附近相关高达 0.5, u_{400} 与 B_a 在西太平洋的最大相关亦达 -0.4, 中高纬度一些 LFO 活动的显著区如北太平洋和北大西洋一带, B_a 与流场的相关也很显著。因此, 在 LFO 活动的显著区, 流场和加热场在低频域内有十分密切的关系, 在热带则尤其明显, 这从一个侧面证实了大气加热对低频振荡产生的重要性。

下面我们从大气加热场各分量与流场的相关分布上来分析各分量在低频振荡产生过程中的相对重要性 (图略), 结果表明, P_T 和流场的相关分布与图 6 基本相同, 而长波辐射 R_0 、 R_s 则基本上相反 (反相关), 净辐射 N_s 、 N_0 与流场的相关一般较小, 由于在 B_a 中辐射加热部分以 $N_0 - N_s$ 的形式出现, 因而辐射加热对上述低频耦合振荡系统的净作用并不大, 另外表面感热通量 H_s 与流场的相关高值区与 LFO 的显著活动区有较大偏离, 因此, 在大气加热场各分量中, 以降水的潜热加热作用最大, 在 LFO 的形成过程中起到关键作用, 这与李崇银^[2]通过动力学分析得到的结论, 即积云对流加热反馈是热带 LFO 产生的最重要因子是完全一致的。

上述低频振荡系统的形成还可以从能量循环过程得到初步的解释。如图 7 所示, 全球大气的平均有效位能和动能均显示出显著的 30~60 天振荡, 因此在有效位能与动能的转换过程中, 也使大气流场呈现显著的 30~60 天振荡。因而从能量循环的角度分析试验结果, 以考察 LFO 的具体产生过程, 将会得到很有意义的结论。

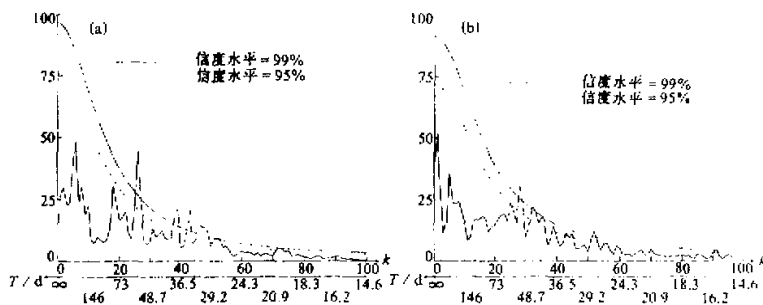


图 7 全球平均有效位能 (a) 与动能 (b) 的功率谱

5 小结与讨论

本文利用 IAP GCM 积分结果中的 10 年候平均资料, 详细分析了模式大气中 LFO 的地理分布、传播和垂直结构, 并探讨了 LFO 产生的机制, 主要得到如下一些结果: (1) IAP GCM 相当逼真地模拟出 LFO 的区域分布特征, 即赤道带是 LFO 最显著的活动区域; (2) 模式还较好地模拟出 LFO 纬向传播的基本特征, 即赤道带以 1 波东传为主; (3) 模式相当准确地模拟出 LFO 的垂直结构, 即热带为斜压, 而中高纬为正压; (4) 模式对 LFO 的准确模拟说明它是大气内部所固有的一种振荡形式, 流场与大气加热场之间的相关分析则从一个侧面表明了大气加热对 LFO 产生的重要性, 其中降水的潜热加热起到了关键作用。

由于 IAP GCM 能够准确再现观测 LFO 的基本特征, 可以把该模式作为我们进一步研究 LFO 的动力学基础, 数值模拟的结果表明, 从能量循环的角度来研究 LFO 的产生机理和过程, 有可能得到新的突破。

参 考 文 献

- 1 Madden, R.D. and P. Julian, 1971, Detecting of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702–708.
- 2 李崇银, 1991, 大气低频振荡, 北京: 气象出版社.
- 3 Lau, K.-C. and K.-M., Lau, 1986, The structure and propagation of oscillations appearing in a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2023–2047.
- 4 Knutson, T. R., K. M. Weickmann and J.E. Kutzbach, 1986, Global-scale intraseasonal oscillation of OLR and 250 mb zonal wind during Northern Hemisphere summer, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 605–623.
- 5 Lau, K.M. and L. Peng, 1987, Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: Basic theory, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 950–972.
- 6 薛峰, 1992, IAP GCM 气候模拟的统计分析 with 模式效能研究, 中国科学院大气物理研究所博士论文.

A Numerical Simulation of Low Frequency Oscillations in the Atmosphere

Xue Feng, Liang Xinzhong, Wang wanqiu and Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, low frequency oscillations (LFO) in the model atmosphere are studied using the 10-year pentad-mean data simulated by the IAP GCM. The results show that the model can simulate the characteristic features of geographical distribution, vertical structure and propagation of LFO with high accuracy. Therefore, LFO is an intrinsic phenomenon in the atmosphere. Correlation analysis between the wind and heating in the low frequency domain shows that the atmospheric heating is important to the formation of LFO, the key factor is the latent heat release of moisture.

Key words low frequency oscillation numerical simulation