

大气中 40—60 天低频振荡形成的 数值试验 *

刘照明 ** 季劲钧 纪立人

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

提 要

观测资料的分析表明, 40—60 天的低频振荡, 除了在赤道附近有向东的传播外, 在副热带和高纬度带还存在向西传播的现象. 本文利用正压原始方程的谱模式, 加以与运动(辐散)相联系的强迫(相当于加热场), 模拟这类低频振荡发现有两类波存在: 一类是周期约为 10—20 天向东传播的行星波, 另一类是周期为 40—60 天向西传播的低频波, 它是前一类行星波的波包相速度, 每天 5—6 经度, 纬向波数为 1. 这类低频波的出现可能是行星波与加热场非线性相互作用的结果.

这里之所以没有得到东传的 40—60 天的低频波, 可能是由于模式格点较疏, 使赤道 Kelvin 波不能明显激发出来.

关键词: 低频振荡; 西传; 数值试验.

一、引 言

大气中 40—60 天低频波, 在近一、二十年来越来越引起广大气象工作者的注意. 早在 70 年代初, Madden and Julian^[1,2]就开始了这项工作. 后来, T. Nakazawa^[3], K. M. Lau^[4]等, 在观测、理论和模拟等方面都进行了大量的研究工作, 他们都得到东行的 40—60 天低频波, 并且认为这就是 Kelvin 波, 而湿对流过程对于这种低频振荡的产生和运行, 起到一个不可缺少的作用. 然而, 近一、二年中, 人们发现: 在大气中不仅存在东传的 40—60 天低频波, 同样也存在西行的 40—60 天的低频波. 吕宏忠^[5]分析 1981 年 7 月到 12 月赤道地区资料发现的向西传播的 40 天周期低频波, 在温度场 (500hPa), 高度场 (850hPa) 和纬向风场 (200hPa 和 850hPa) 中, 这种西行的低频波很明显. 认为东太平洋地区从南半球到北半球的越赤道 40 天周期的温度波是造成这种西行波动的主要原因. Y. Kushnir^[6]得到在北半球冬季中高纬地区存在向西传播的 30 天左右的低频振荡波, 认为 Rossby 波是促使这种振荡波西移的主要因子.

本工作从正压原始方程谱模式出发, 考虑热带地区随运动而调整的加热作用, 来研究大气中的 40—60 天低频振荡波的产生与传播的特性及物理机制.

1989 年 10 月 19 日收到, 1991 年 8 月 19 日收到再改稿.

* 为国家自然科学基金资助项目.

** 现在江西省交通规划勘察设计院.

二、模式与加热

本试验采用全球正压原始方程谱模式, 在球面上基本方程为,

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} F_v - \frac{\partial}{a \partial \mu} F_u - R_1 \zeta, \quad (1)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} F_u + \frac{\partial}{a \partial \mu} F_v - \nabla^2 \left[\frac{U^2 + V^2}{2(1-\mu^2)} + \phi' \right] - R_1 D, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi'}{\partial t} = & - \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (U \cdot \phi') - \frac{\partial}{a \partial \mu} (V \cdot \phi') - \tilde{\phi} \cdot D \\ & - R_2 \cdot \phi' + Q, \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $U = u \cdot \cos \varphi$, $V = v \cdot \cos \varphi$, $\mu = \sin \varphi$,

$$F_u = V \cdot (\zeta + f), \quad F_v = -U \cdot (\zeta + f).$$

u, v 分别为纬向风和经向风风速; D, ζ, ϕ' 分别为散度、涡度和位势高度; R_1, R_2 为摩擦阻尼系数, 取 $R_1 = 1.0 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$, $R_2 = 5.25 \times 10 \text{s}^{-1}$, Q 为作用热源函数, $\tilde{\phi} = 7.84 \times 10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, 是参考位势高度值; φ, f 分别为纬度和科里奥利系数。

对方程(1)–(3)分别利用半隐式差分格式进行积分运算。第一步用时间向前差, 时间步长 $\Delta t = 2700 \text{s}$, 第二步以后用时间中央差, 时间步长为 $\Delta t = 5400 \text{s}$, 然后在球面上对方程进行球谱函数展开, 采用三角形波数截断, 截断波数为 10, 球面网格点分布为 (32, 26)。每个独立变量用球谱函数展开, 非线性项则采用谱变换方法计算得到。

由于在正压大气中, 热源相当于大气中的辐散, 为简便起见, 取,

$$Q(\lambda, \varphi, t) = \delta_0 \cos \frac{a}{L} \cdot \lambda \cos \frac{a}{L'} \varphi \cdot R_0 \cdot D(\lambda, \varphi, t), \quad (4)$$

其中, $L = 6.0 \times 10^6 \text{m}$, $L' = 1.5 \times 10^6 \text{m}$;

$$\delta_0 = \begin{cases} 1 & \text{当 } |L_\lambda| \leq L \\ & |L_{\varphi}| \leq L' \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } |L_\lambda| > L \\ & |L_{\varphi}| > L' \text{ 时} \end{cases}, \quad (5)$$

L, L' 分别为热源的纬向尺度和经向尺度 $L_\lambda = a\lambda$, $L_\varphi = a\varphi$; δ_0 为热源位置控制系数, a 为地球半径, λ, φ 分别为经度与纬度, 可以知道热源是一赤道地区椭圆形的位置固定的作用源, 它是随运动的散度 D 呈线性变化的。 R_0 为一常数, 取 $R_0 = 5.5 \times 10^{-4}$ 。K. M. Lau 和 L. Peng^[7] 将这种形式的加热运用于斜压大气谱模式中, 得到在湿模式中可激发出东传的 40—60 天低频波, 而在子模式中却只有西行模态, 他们认为: 湿对流动力过程是 40—60 天低频波产生的不可缺少的机制。下面, 来考察(4)式作用于正压大气模式中的试验情况。

三、试验结果及讨论

试验所采用的初始场为一北半球冬季气候平均风场(图 1), 它是南北半球对称的. 经向初始风速为 $v_0 = 0$, 在温带地区($\sim 30^\circ\text{N}$)有一急流带最大风速为 26m/s , 而在高纬($\sim 80^\circ\text{N}$)有一弱的急流带, 风速为 9m/s . 初始风场与初始位势高度场是成地转关系, 为

$$u_0 = -\frac{9.8}{f} \frac{\partial H_0}{\partial y}, \quad (6)$$

但是, 在赤道地区($f \rightarrow 0$)及高纬极地带(有曲率项)由于地转关系不适合采用线性插值方法来求初始位势高度值, 因此, 只能利用模式本身来调整.

另外, 为了研究的简便, 试验中对于每个变量场均采用计算其纬向距平值的方法, 这样, 能更好地定性分析试算结果.

对模式进行了 200 天的时间积分, 图 2 是中纬度位势高度纬向距平随时间的变化. 可以发现这里存在一种 10—20 天周期的行星振荡波, 这种行星波是向东传播的. 然而, 当分析其极值中心的时间变化时发现: 极值中心是 40—60 天的低频波, 它是向西传播的. 这种 40—60 天的低频波是东传的 10—20 天行星波的波包, 并向西传去.

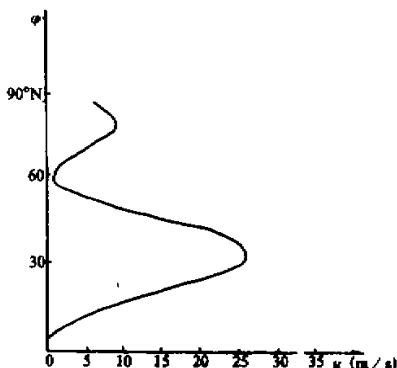


图1 北半球初始风场

赤道纬向风的时间演变, 对于大气中的低频振荡现象, 也是一个很好的判断因子. 图 3 为赤道地区纬向风随时间的变化图, 可以得到, 这里同样得到西传的 40—60 天低频波及东传的 10—20 天的行星波, 并且前者为后者的波包.

下面, 着重考察这种西传的 40—60 天的低频波. 图 4 为计算所得到的赤道地区涡度纬向距平随时间的纬向传播. 可以看到, 这里有一明显 40—60 天的低频波存在, 其纬向波数为 1 并且以 5—6 经度/d 的速度向西移去. 这是一个很令人感兴趣的结果.

根据 Goswami^[8], Y. Y. Hayashi^[9] 等人的工作结果, 这种低频波主要是以向东传播为主. 为了进一步了解这种西传的 40—60 天振荡波的产生及传播的物理特性与机制, 我们计算了能量转换的时间变化.

设能量转换函数为 C , 则:

$$\begin{aligned} C_{(E_p, E_k)} &= -\frac{1}{g} \int V_p \cdot \omega \cdot dV_p \\ &= \frac{1}{g} \int V_p \cdot \vec{V}_h \cdot \nabla_p b \cdot dV_p, \end{aligned} \quad (7)$$

C 表示有效位能 E_p 与动能 E_k 之间的转换.

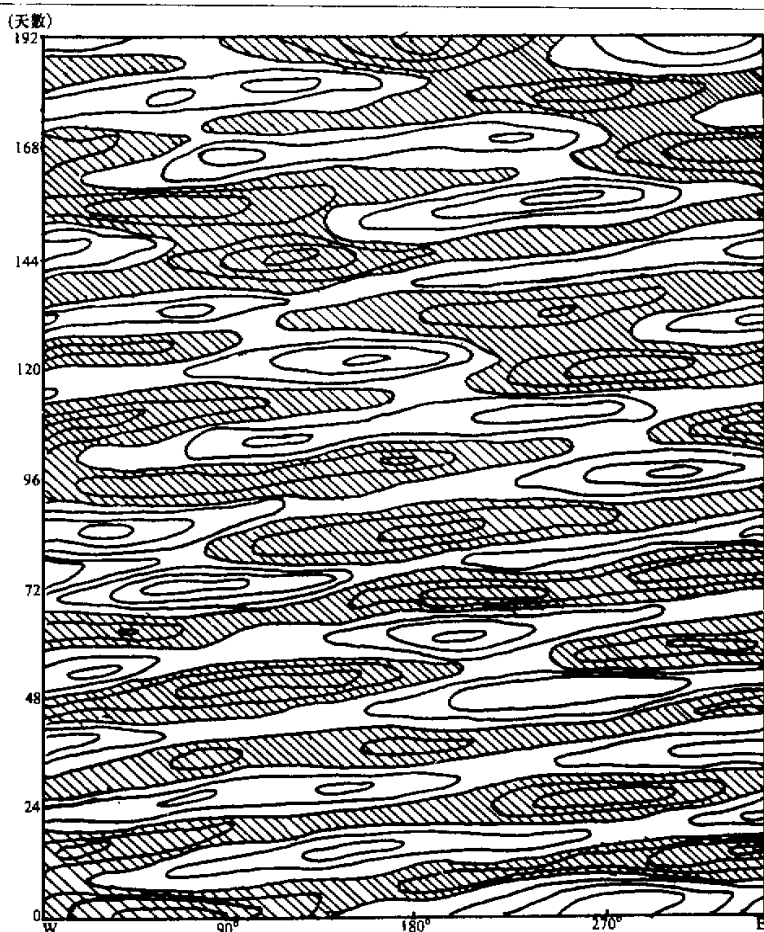


图 2 中纬位势高度纬向距平随时间的变化

阴影部分为负值区

图 5 是能量转换函数 C 在副热带地区的时间演变。可以看到：这里同样存在一西传的 40—60 天低频波，说明这种 40—60 天的低频振荡可能是运动与热力过程之间的非线性相互作用，通过能量之间的相互转换来实现的。由于热源是在赤道地区，由加热所产生的瞬变扰动将会在 Rossby 波的基本模态的作用下向源区以外的西、北方向传去。

另外，从图 5 中可看到，能量转换 C 在前期的 40—60 天振荡并不明显，只是在后期才明显。这是由于加热所产生的位能向动能的转换在开始时很激烈（因此，周期较短），但经过一段时间的调整适应过程，最后使系统达到一个稳定的状态。

Rossby 波频散对于能量从低纬向高纬的传播起着不可缺少的作用。R. A. Madden^[10] 认为，大尺度的 Rossby 波具有向西传播的性质，并且定常的作用源能使 Rossby 波产生共振。

Rossby 波频率为，

$$\sigma = - \frac{\beta h}{(h^2 + f) + \frac{1}{\lambda^2}}, \quad (8)$$

其中, λ 为 Rossby 变形半径; h, l 分别为纬向与径向波数, $\beta = \frac{df}{dy}$ 由(8)式得到,

$$C_{yx} = \frac{\beta}{[(h^2 + f) + \frac{1}{\lambda^2}]^2} (h^2 - f - \frac{1}{\lambda^2}). \quad (9)$$

可以知道, 当 $h^2 < f + \frac{1}{\lambda^2}$ 时, 即对于 Rossby 长波来说, $C_{yx} < 0$, 能量向西传播, 而当 $h^2 > f + \frac{1}{\lambda^2}$ 时, 短的 Rossby 波能向东传播. 因此, 可以认为: 正压大气中的 40—60 天向西传播的低频振荡波是长的 Rossby 波, 它也是 10—20 天行星波的波包形式; 而这种 10—20 天向东传播的行星波是 Rossby 短波.

关于赤道地区的加热 Q , 吕宏忠^[5]计算得到, 在赤道地区, 加热作用主要是以潜热形式为主. 而且, 由于赤道地区的对流指数大, 可以认为, 赤道地区由于对流所产生的潜热释放为加热 Q 的主要来源, 且同运动的散度场相联系. 方程组(1)–(3)和加热函数的形式(4)式表明模式在一定程度上反映了这种加热作用以及它与环流系统相互制约, 相互反馈的特点. 因此, 虽然在本试验中没有考虑加热 Q 的具体形式, 但是, 仍然可以认为湿对流过程是产生 40—60 天低频波的必不可少的过程. 这种反馈过程是维持加热作用, 激发 40—60 天低频波的必要条件.

为什么在这里仅得到西传的 40—60

天低频振荡, 而常见的东传 40—60 天低频波却不能得出来呢? 我们认为, 一方面, 由于模式本身的原因: 模式格点的径向间距为 7 个纬度左右, 且赤道上无格点. 众所周知, 赤道 Kelvin 波的经向宽度很窄, 为南北纬各 5° . 这样, 在本试验中, 由于格点稀疏, 赤道 Kelvin 波被滤掉了; 另一方面根据 M. Yanai 和 M. M. Lu^[11] 得到: 赤道对称与赤道反对称风场对于产生 Rossby 波或混合 Rossby 重力波没有影响, 其结果均为西传. 因此, 这种南北球对称的初始场也可认为是产生 40—60 天振荡西传的原因之一. 但这些并不意味着在大气中, 40—60 天振荡向东传播的波是不存在的.

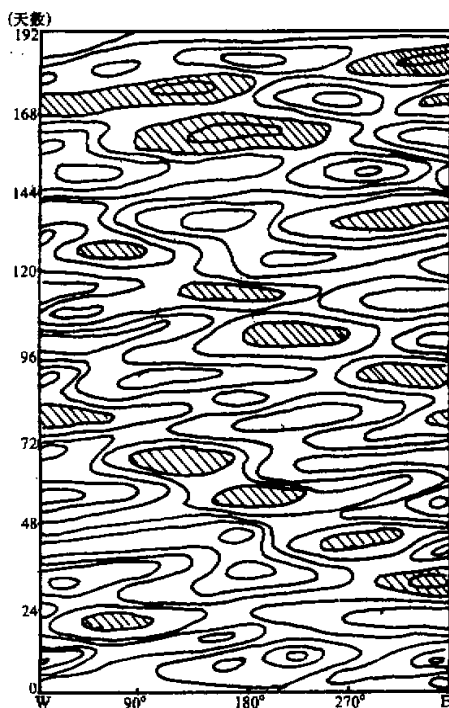


图3 赤道地区纬向风随时间的变化(m/s)
阴影部分为最大风速区

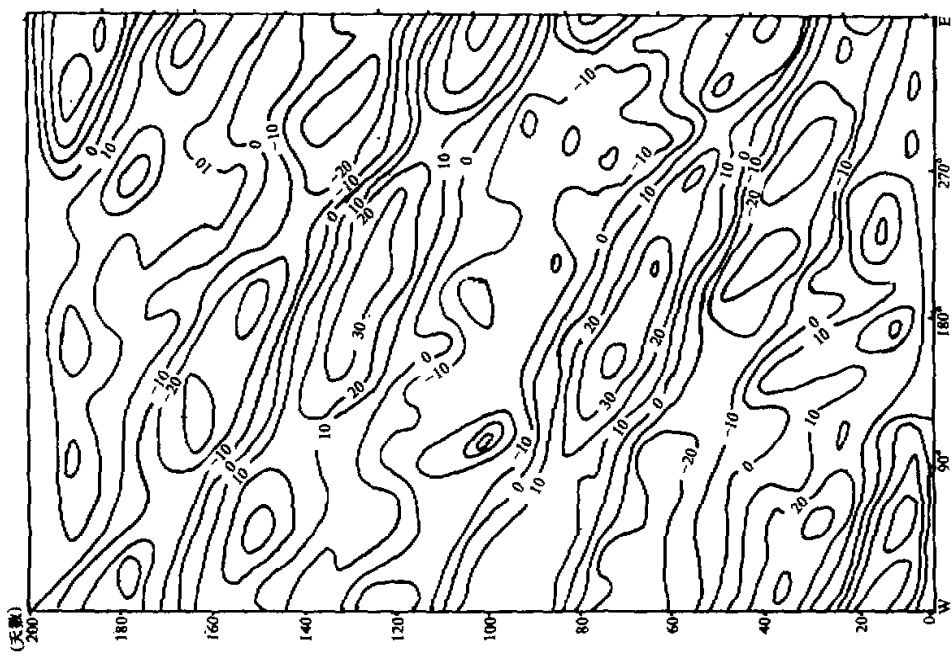


图4 赤道地区涡度纬向距平随时间的变化
(10^{-2} s^{-1})

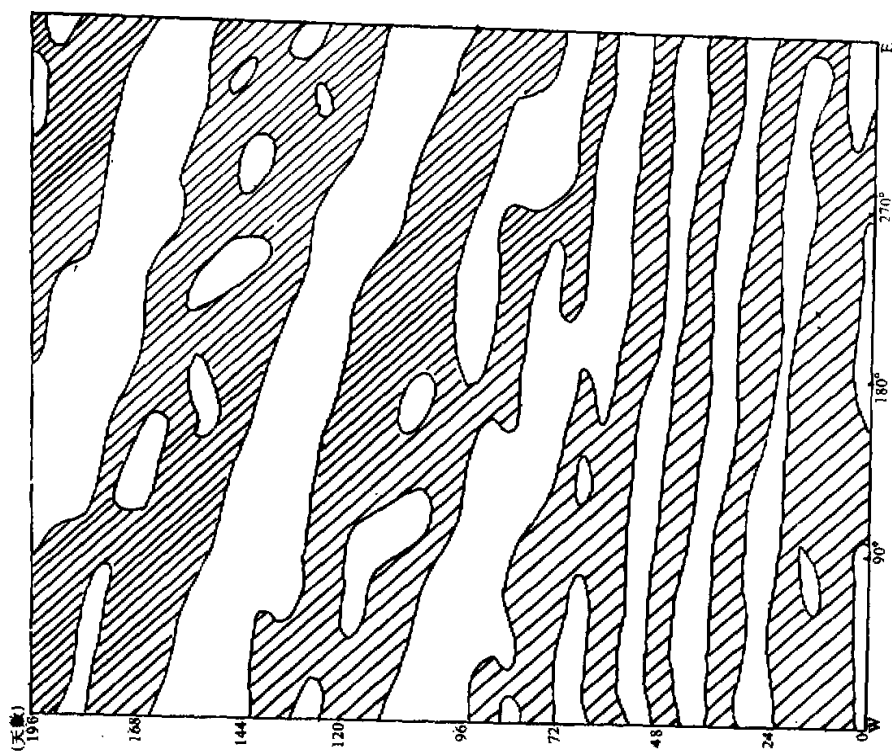


图5 能量转换函数C在热带地区的时间演变
阴影部分为负值区

四、结 论

赤道地区随运动而变化的加热源作用于大气, 可激发出两种不同形式的波动, 其中 40—60 天的低频波是以 5—6 个经度/天的速度向西传去, 其纬向波数为 1; 而 10—20 天的行星波则是向东传播, 其波包形式就是西传的 40—60 天的低频波. 这两种波分别向西、向东传播, 其波速和频率则明显受到加热反馈作用的制约. 可以认为, 这两种振荡的产生和传播是由于加热与运动的相互反馈, 通过能量之间的相互转换来实现的.

致谢: 陈雄山先生提供了正压原始方程谱模式的程序, 谨致谢意.

参 考 文 献

- [1] R. Madden and P. Julian, 1971, Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind and in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702—708.
- [2] R. Madden and P. Julian, 1972, Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40—50 day period, *J. Atmos. sci.*, **29**, 1109—1123.
- [3] T. Nakazawa, 1986, Intraseasonal variations of OLR in the tropics during the FGGE year, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 17—34.
- [4] K. M. Lau and P. H. Chan, 1985, Aspects of the 40—50 day oscillation during the northern winter as infer from OLR, *Mon. Wea. Rev.*, **113**.
- [5] 吕宏忠, 1987, 赤道地区向西传播的 40 天周期低频波, 气象科学研究院硕士论文.
- [6] Y. Kushnir, 1987, Retrograding wintertime Low frequency disturbances over the north Pacific Ocean, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2727—2742.
- [7] K. M. Lau and L. Peng, 1987, Origin of Low frequency (intraseasonal) oscillation in the tropical atmosphere, Part I Basic theory, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 950—972.
- [8] B. N. Goswami and J. Shukla, 1984, Quasi-Periodic oscillations in a symmetric general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 20—27.
- [9] Y. Y. Hayashi and A. Sumi, 1986, The 30—40 day oscillations. Simulated in an "Aqua Planet" model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 451—467.
- [10] R. A. Madden, 1979, Observations of large-scale travelling Rossby waves, *R. Geo. Space Phys.*, **17**, 1935—1950.
- [11] M. Yanai and M. M. Lu, 1983, Equatorial trapped waves at the zomb Level and their association with meridional convergence of wave energy flux, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 2785—2803.

Numerical Experiment on the Formation of 40—60 Day Low-Frequency Oscillation in the Atmosphere

Liu Ximing, Ji Jinjun and Ji Liren

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

Abstract

By analysing the observation data, It is shown that besides eastward propogation in the

equatorial area, the westward propagation of 40 – 60 day oscillation in the subtropical and high-latitude areas also exist. Using a barotropic primitive equation spectral model with a forcing (analogous to a heating field) which is changed with atmospheric motion, this kind of oscillation is simulated. It is found that there are two kinds of oscillations, i.e., 10 – 20 day planetary wave which propagates eastwards and 40 – 60 day low-frequency wave which propagates westwards. This 40 – 60 day low-frequency wave is a wave packet of planetary waves and has a zonal wavenumber 1 structure with a phase speed 5 – 6 longitudes per day. This kind of low-frequency wave seems to be the results of the nonlinear interactions between the planetary wave and heating field.

The reason that the eastward propagating 40 – 60 day oscillation can not be obtained here is that the model resolution is too low, and the Kelvin wave can not be correctly described.

Key words: Low-frequency oscillation; Westward propagation; Numerical experiment.