

赤道地区向西传播的40天周期低频波*

吕宏忠 张先恭 丁一汇

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

本文用滤波和EOF位相合成技术对1981年7—12月份赤道地区出现的向西传播的40天周期低频波进行了分析。结果认为东太平洋地区从南半球到北半球的越赤道40天周期温度波是产生这种西传波的主要原因。这种波动主要产生于两个源地：一个是赤道 150°E 附近的对流层下层；另一个是 110°W 的赤道对流层上层。这两处产生的低频波性质不一样，前者与对流密切相关。通过计算整层积分的非绝热加热 Q_1 和水汽汇 Q_2 ，结果表明 Q_1 加热中心在东太平洋也有越赤道传播。在 150°E 以西 Q_2 加热中心是向西北传播的，与低频波方向一致， Q_1 的传播特征不明显，这说明西太平洋地区的热带对流可能有这种周期振荡。

一、引 言

30—50天周期振荡是热带大气中令人瞩目的现象之一，这种振荡是由Madden和Julian^[1]于1971年首先发现的。这种振荡以纬向环流圈的形式沿赤道自西向东传播，伴随着这种环流圈的移动，地面气压场以及高低层的纬向风场都呈现出相应的振荡。

最近，许多学者用FGGE年的资料对这种振荡进行了大量研究。通过对速度势场进行经验正交函数分析，Lorenz^[2]认为FGGE全年都存在着向东传播的振荡。通过分析40—50天时间尺度的辐散环流，Krishnamurti等^[3]证实了FGGE全年存在着行星尺度的向东传播的散度波，其速度为8经度/d。Murakami和Nakazawa^[4]认为这种向东传播的低频波在 60°E 以东的印度洋和日界线以西的西太平洋反映最显著，并认为当低频波通过此地时可引起瓦克环流强度的显著变化。T.Murakami和陈隆勋等^[5]对滤波后的向外长波辐射(OLR)资料用扩展的经验正交函数方法进行了分析，结果指出了OLR场的系统性向东传播，且在 60°E 到日界线(即印度洋和西太平洋)之间最为显著。刘家铭和刘雅章^[6]对GFDL的12年的大气环流模式结果的分析指出，模式大气中同样存在着这种向东传播的振荡。

总之，无论是观测结果还是模拟结果都认为这种行星尺度的波动是向东传播的，尤其是在印度洋和西太平洋地区。本文主要从观测方面来研究一种与此相反的波动，即赤道地区向西传播的40天周期低频波。

* 本文于1987年8月17日收到，1989年4月4日收到修改稿。

二、资料及计算程序

本文所用资料为欧洲中心客观分析资料,研究范围为 30°N 至 30°S , 60°E 至 90°W 。 p 坐标系中的垂直速度 ω 是用订正的 C'Brioen 方法重新计算的,并考虑了地形的影响。

我们按照如下的方程计算了大尺度显热源和水汽汇:

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + \left(\frac{p}{p_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] \quad (1)$$

$$Q_2 = -L \left[\frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} + V \frac{\partial q}{\partial y} + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right] \quad (2)$$

对计算出的 Q_1 和 Q_2 进行了垂直积分,得到了整层大气的总的显热源和水汽汇。

用角括号 $\langle \rangle$ 代表 6 个月的平均值,星号 * 代表对平均值的偏差,例如, U 可以表示如下:

$$U = \langle U \rangle + U^* \quad (3)$$

这样, U^* 表示了 U 的瞬变分量,我们进一步将 U^* 分解为如下两部分:

$$U^* = a + b(t - t_0) + c(t - t_0)^2 + U' \quad (4)$$

这里 t_0 对应于 9 月 30 日(6 个月时报的中心值)。前三项之和代表了 U^* 的季节变化趋势;系数 a, b, c 用最小二乘法确定,因此, U' 只与季节内的瞬变变化有关。

为研究 30—50 天周期振荡,我们对所有变量的“'”项进行滤波,例如平滑后的时间序列资料 \tilde{U}_n 的第 n 个值可由下式得到:

$$\tilde{U}_n = a_0(U'_n - U'_{n-2}) - b_1 \tilde{U}_{n-1} - b_2 \tilde{U}_{n-2}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

此处

$$a_0 = \frac{2 \Delta \Omega}{4 + 2 \Delta \Omega + \Omega_0^2}, \quad b_1 = \frac{2(\Omega_0^2 - 4)}{4 + 2 \Delta \Omega + \Omega_0^2}, \quad b_2 = \frac{4 - 2 \Delta \Omega + \Omega_0^2}{4 + 2 \Delta \Omega + \Omega_0^2}$$

$$\Delta \Omega = 2 \left| \frac{\sin(\omega_1 \Delta t)}{1 + \cos(\omega_1 \Delta t)} - \frac{\sin(\omega_2 \Delta t)}{1 + \cos(\omega_2 \Delta t)} \right|$$

$$\Omega_0 = \frac{4 \sin(\omega_1 \Delta t) \sin(\omega_2 \Delta t)}{\{1 + \cos(\omega_1 \Delta t)\} \cdot \{1 + \cos(\omega_2 \Delta t)\}}$$

这里, $N = 124, \Delta t = 1(\text{d}), \omega_0 = 2\pi/40, \omega_1 = 2\pi/30, \omega_2 = \omega_0^2/\omega_1$ 。

如上所述的滤波器在 30 天及 53 天附近的响应值为 0.5,而在 40 天附近接近于 1.0。这样,30—53 天振荡对滤波后的时间序列资料贡献最大。以后我们将 30—50 天带通滤波后的振荡简称为 40 天周期振荡。

三、赤道地区向西传播的 40 天周期振荡

通过分析 1981 年全年低频波的传播特征,我们发现低频波的传播方向各纬度有很大差异,而同一纬度的不同季节也是不同的。在赤道附近的传播特点是:7 月份以前东半球大部分地区为驻波振荡,而西半球则是向西传播;而 7 月份以后的后半年,在 5°S — 15°N ,

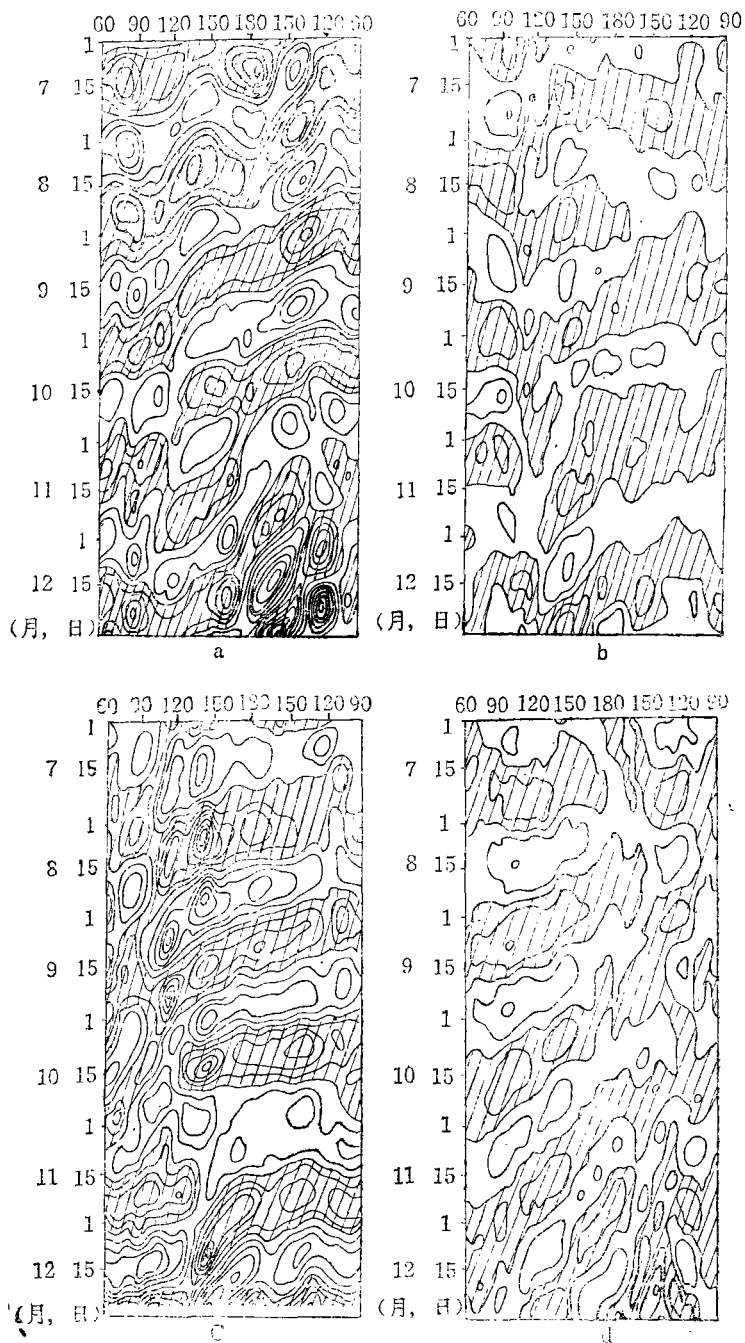


图 1 各要素的时间—经度剖面图

- (a. 赤道 200 hPa U , 等值线间隔为 2 m/s, 阴影为负值;
 b. 赤道 850 hPa U , 等值线间隔为 2 m/s, 阴影为负值;
 c. 10°N 850 hPa Φ , 等值线间隔为 2 gpm, 阴影为负值;
 d. 10°N 500 hPa T , 等值线间隔为 1°C, 阴影为负值)

90°E—110°W 范围内出现了低频波的持续向西传播,本节及以后的几节将重点讨论这种赤道地区的西传波。

图 1 为各要素在赤道及 10°N 处的时间-经度剖面图。由图 1 a 可看出在赤道上 200 hPa 纬向风扰动首先在 110°W 产生,然后向东、西两侧传播(向东传播的在此不论),当西传到 140°W 附近时扰动加强,振幅最大为 8 m/s,接着振幅减小,这时在 140—150°E 附近又有一扰动产生并向西传(以后将在垂直位相图上看出,此处的扰动来自对流层下层)。当扰动到达 85°E 时不再向西传播,西传的速度为 5 经度/d。而 T.Murakumi 和陈隆勋等用 OLR 资料分析的结果认为向东传播的低频波的速度为 8 经度/d,显然西传波要比东传波慢得多。

由图 1 b 可知低层纬向风的传播只是在 180°E 以西才明显,强度也不如高层,最大振幅为 4 m/s,当传到 105°E 时趋于停止。

图 1 中的 c 及 d 分别是 10°N 处的 850 hPa 高度场及 500 hPa 温度场的传播情况。我们对图 1 c 极为感兴趣,从图上看出当位势高度扰动西传到 140°E 时,振幅急剧加大,这说明当低值系统从东边移到此处时,中心加强,气压降低。在 140°E, 10°N 处 850 hPa 高度值的滤波曲线(图略)表明高度值的负位相总是对应着该地一次台风的发生。

由于热带地区的加热主要是通过晴空区的辐射冷却和对流区的凝结加热两种方式进行,因此,中、上层的温度变化可反映对流活动的强弱。从图 1 d 可看出 500 hPa 上的温度扰动是一直向西传播的,这反映了热带对流系统的向西传播。

总之,通过分析赤道及 10°N 处各种要素的传播,我们认为这种向西传播的低频波在各个要素均有反映。10°N 上比赤道上的传播更加突出。

四、EOF 分析及西传波的综合位相

为清楚地刻划低频波的传播特征,我们对滤波后的要素进行了 EOF 分析。设 $F(x, y, n)$ 表示 $X-Y$ 平面上的 M 维向量的第 n 次观测值, $F(x, y, n)$ 可表示为:

$$F(x, y, n) = \sum_{m=1}^M C_{mn} E_m(x, y),$$

$$(n=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

此处 E_m 表示第 m 个特征值所对应的特征向量,而 C_{mn} 是第 m 个特征向量在时间 n 的系数; $n=1$ (7 月 1 日) 至 $N=153$ (11 月 30 日)。

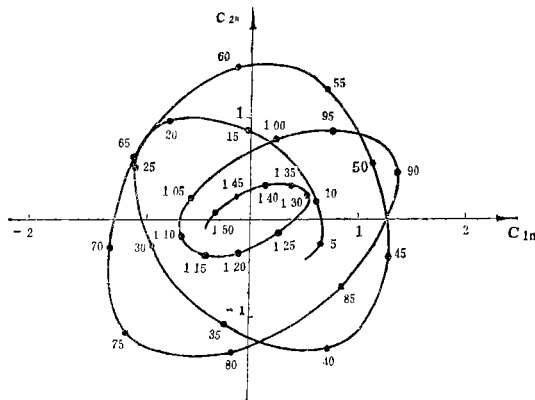


图 2 40 天带通滤波后 850 hPa \tilde{u} 的前两个时间系数 C_{1n}, C_{2n} 的位相曲线 ($n=1$ 至 $n=153$)

图 2 刻划了 40 天带通滤波后 850 hPa \tilde{u} 的时间系数 C_{1n} 及 C_{2n} 的位相曲线 (从 $n=1$ 至 153)。由图 2 可清楚地看出 C_{1n}, C_{2n} 系数的反时针旋转,这表明了 850 hPa \tilde{u} 的向西传播。200 hPa \tilde{u} 的前两个时间系数 C_{1n}, C_{2n} 的位相曲线也是反时针旋转的(图略)。

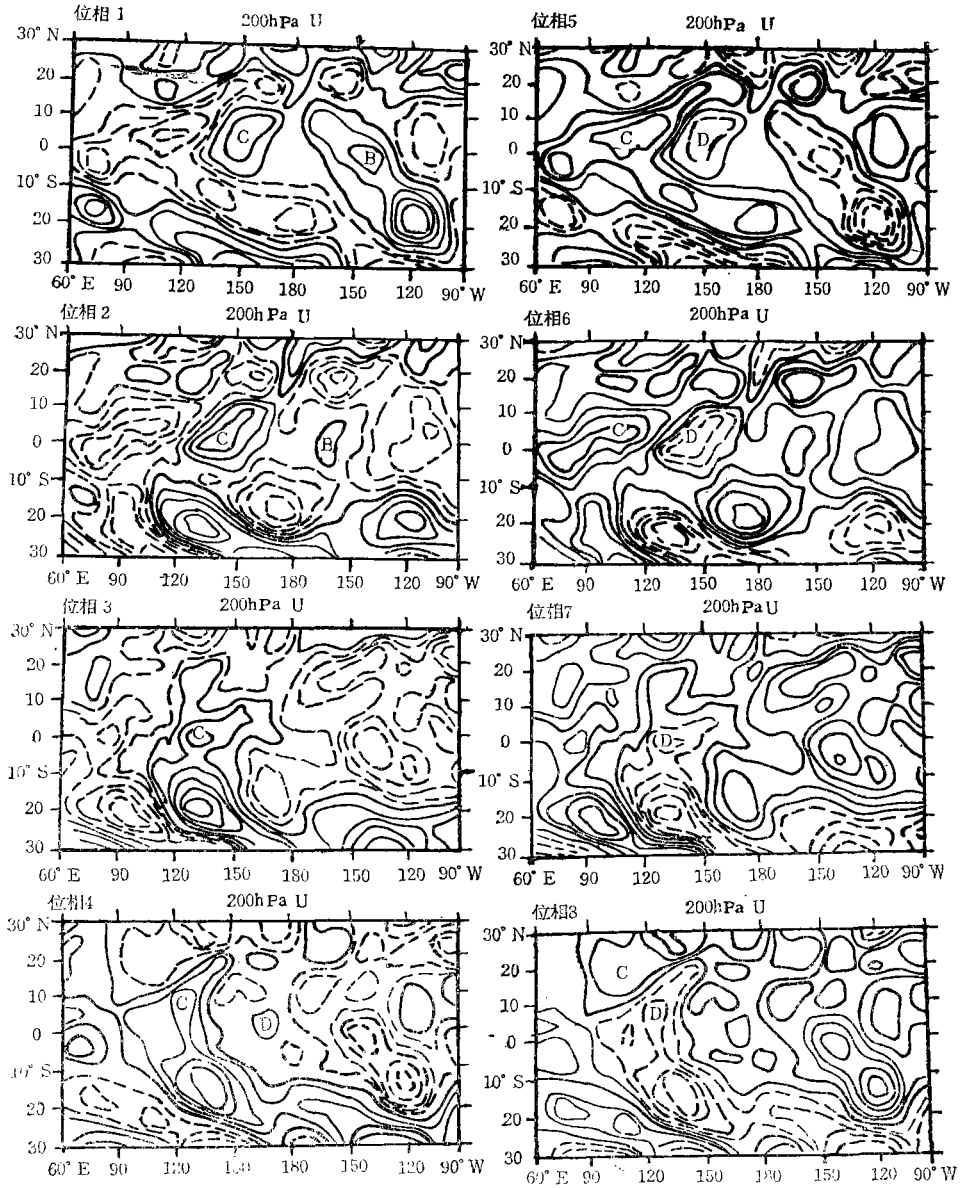


图 3 滤波后 200 hPa u 的综合位相
 (实线为正值(西风),虚线为负值(东风),粗实线为零线,等值线间隔为 1 m/s)

参照图 2 的位相变化曲线,我们对各个层次上的各种要素分别进行了位相综合。由图 2 可知在第 8 天附近, C_{1n} 达最大值, C_{2n} 则为零;而在第 28 天附近, C_{1n} 达最小值(负值), C_{2n} 为零;当曲线旋转到 48 天时, C_{1n} 达到另一个极大值,而 C_{2n} 又达到零。这样,从第 8 天到第 48 天, C_{1n} 和 C_{2n} 的变化经历了一个周期。我们从 C_{1n} , C_{2n} 的时间序列资料中选取了三个周期(平均长度为 40 天)进行同位相合成。下面我们来确定位相(从 1 到 9),第 1 位相选在第 8 天、第 48 天及第 89 天附近,这里 C_{1n} 为最大值, C_{2n} 接近零,每位相包括 5

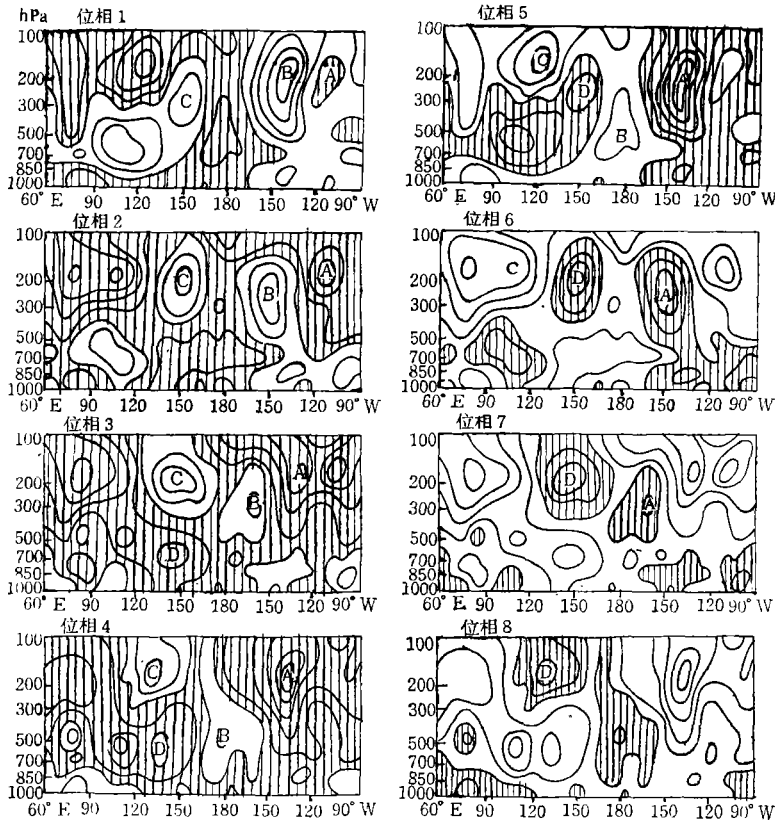


图 4 赤道附近滤波后纬向风 U 的综合位相
(阴影区代表负值(东风),等值线间隔为 1 m/s)

天时间。第 5 位相取在第 28 天、第 69 天及第 109 天附近,此处 C_{1n} 为最小值, C_{2n} 为零。类似地,第 3 位相取在第 15 天、第 58 天及 101 天附近,此处 C_{1n} 为零, C_{2n} 为最大值;第 7 位相取在第 36 天、81 天及 123 天附近。由图可见,1,3,5 及 7 位相位于坐标轴附近,我们将 2,4,6 及 8 位相选在四个象限的中央。将每个位相附近 5 天的 C_{1n} , C_{2n} 的值进行平均。设 C_{mi} 表示第 m 个特征向量在位相 i 的值,则对于 850 hPa 场来说,在位相 i 的平均值可近似为:

$$\tilde{U}_{850}(x, y, i) = \sum_{m=1}^8 C_{mi} E_m(x, y) \quad (i=1, 2, \dots, 8) \quad (7)$$

这里我们取前 8 个特征向量来近似地表示原场,这样已经保留了总方差的 95%,因此可以有效地消除不必要的小尺度噪音,从而保留了 40 天振荡的大尺度环流特点。

我们在 60°E 至 90°W 及 30°N 至 30°S 范围内也对其它要素 (V, Φ, T, Q_1 及 Q_2) 进行了类似的位相合成。

图 3 为合成后的 200 hPa 纬向风 U 的 8 个位相,第一位相,赤道 150°E 附近有一西风扰动 C,同时在赤道东太平洋存在着另一西风扰动 B;第二位相时,C 及 B 都向西移动;在第三及第四位相时,C 继续西移而 B 消失;在第四位相时赤道中太平洋出现了一东风扰

动 D, 从第五到第八位相, C 向西北方向移动, 而 D 与 C 的传播路径完全相同, 这说明这种向西传播的低频波起源于 150°E 附近的赤道太平洋。让我们再来分析一下东太平洋地区的变化。第一位相, 赤道东太平洋存在一东风(负的)扰动区; 第二、三位相时, 这一扰动区范围扩大并向各个方向传播; 在第四位相, 东太平洋地区又形成一西风扰动(正的), 以后的各位相中此扰动向四周扩展。低频扰动为何及如何在这两个地区产生的, 以下我们将进一步阐述这个问题。

图 4 是滤波后的纬向风在赤道平面上的合成图。这张最终的合成图是将 5°S , 5°N 及赤道三个纬向平面上的结果平均后得到的。图中的字母所代表的扰动与图 3 完全一致。由图第一位相可知, 有两个扰动 C, B 分别位于 150°E 及 140°W 附近, 以后的各位相中, C 向上然后向西移动, B 则是向西、向下移动。另外, 在 150°E 附近对流层低层产生的 D(位相 3) 与在 110°W 附近对流层高层产生的 A(位相 1) 分别与 C, B 的移动路径一致(见位相 5—8)。

五、东太平洋越赤道的 40 天周期温度波与低频波形成的一种可能机制

众所周知热带地区的辐散环流是由热力来驱动的。图 5 是 1967 年 6, 7, 8 三个月平均的 200 hPa 速度势场。图 5 的主要特征是在亚洲季风区和中美洲分别有一热源, 在热带东太平洋有一冷源。热源和冷源分别对应着辐散和辐合中心。图 5 表明 200 hPa 上行星尺度的辐散环流是由热源流向冷源。多年平均结果与该图非常一致。

图 6 是滤波后 850 hPa 温度场的综合位相, 该图的最显著特征是东太平洋越赤道的温度波。第一位相, 在 150°W — 120°W 的东南太平洋存在着一负的温度扰动, 以后的各位相中, 这一负扰动越过赤道传向北半球。在第三位相时东南太平洋有一正的扰动形成, 以后又逐渐向北移动。这种温度波的最大振幅为 0.6°C 。

为了弄清这种温度波的垂直结构, 我们将其每个位相的高度-纬度剖面图作了出来(图略)。结果表明这种温度波不仅存在于低层而是存在于整个对流层, 且各层的位相是一致的。

正如图 6 所示, 越赤道温度波在 110°W — 160°W 最为清楚, 然而此处正是最强的冷源所在(见图 5)。在图 6 的第二、第三位相, 赤道东太平洋地区为温度波的负值所控制, 因此, 该地区的冷源强度被加强, 故瓦克环流及位于东太平洋和中美洲之间的环流加强, 其结果会使冷源东侧东风加强(即产生负的扰动)和冷源西侧西风加强(即产生正的扰动)。这在图 3 上反映十分清楚, 在图 3 的二、三位相上, 赤道 150°E 附近为西风扰动(正的), 而赤道 110°W 附近为东风扰动(负的); 在第六、七位相, 赤道东太平洋为温度波的正位相所控制, 使赤道东太平洋的冷源强度减弱, 纬向环流也随之减弱, 图 3 六、七位相上纬向风扰动的变化证明了这一点。纵观图 3 的八个位相, 我们发现无论哪个位相, 赤道 150°E 与赤道 110°W 两处的扰动总是保持相反的符号。这进一步说明这样与南半球冷空气活动有关的越赤道温度波是形成热带地区低频扰动的一种可能机制。

850 hPa 上位势高度的合成图(图略)表明在赤道印度洋上空不断有槽、脊交替产生并

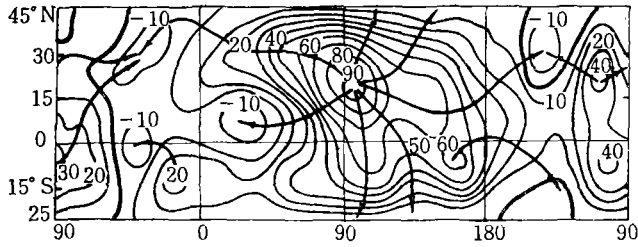


图 5 1967 年夏季平均 200 hPa 速度势场和有散度部分风场的流线
(图中单位: $10^5 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

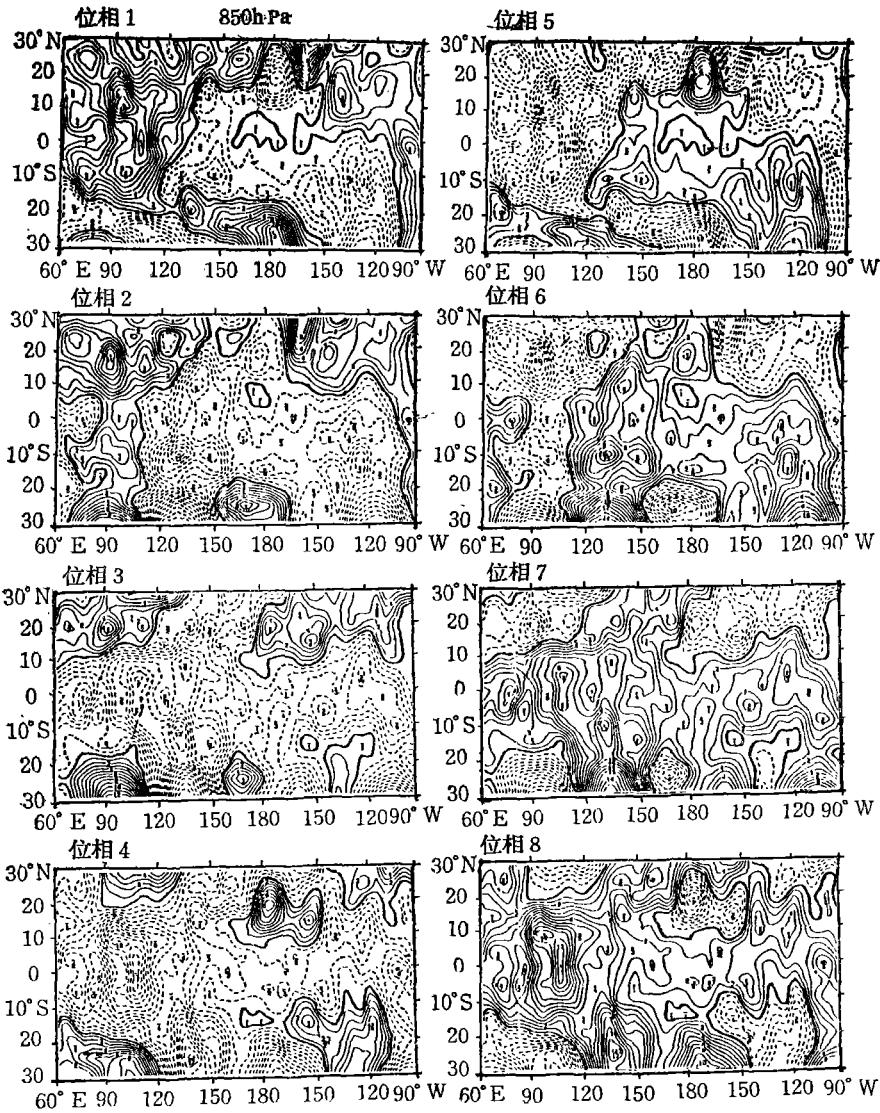


图 6 滤波后 850 hPa 温度场的综合位相
(实线为正, 虚线为负, 等值线间隔为 0.1°C , 粗实线为零线)

向北传播, 由于很多学者对这种现象与印度季风的关系作了大量研究, 我们在此不再讨论。

通过计算整层积分的非绝热加热 Q_1 和水汽汇 Q_2 , 结果表明 Q_1 在东太平洋地区有越赤道传播现象。这就进一步证实了赤道上的加热强迫是产生西传低频波的主要原因。在 150°E 以西地区 Q_2 是向西北方向传播的, 与低频波方向一致, 而 Q_1 的传播不明显, 这说明该处的波动是一种以潜热加热为主的波动。

六、结 论

通过全文的讨论, 我们得出如下结论:

(1) 1981 年 7—12 月份赤道地区出现了向西传播的 40 天周期低频波, 这清楚地反映在温度场、高度场及纬向风场上, 这种波动的西传范围为 90°E — 110°W 以及 15°N — 5°S , 对流层低层的南北范围比高层宽, 最明显在 10°N 附近, 西传的速度约为 5 经度/d。

(2) 关于低频波的源地, 除了众所周知的赤道印度洋上空外, 与西传波有关的主要有两个, 一个是赤道 150°E 附近, 另一个是赤道 110°W 附近。 110°W 处产生的纬向风扰动向各个方向传播, 向西的一支在传播过程中逐渐向下。在 150°E 处, 低频波由低层向高层传播, 然后逐渐转向西北。

(3) 在这两处产生的低频波都是由东太平洋地区从南半球到北半球的越赤道 40 天周期温度波造成的。当温度波周期性地通过冷源上空时, 引起了热带纬向环流的周期性振荡, 这突出反映在赤道 110°W 和 150°E 上空东、西风气流的周期性加速和减速, 从而产生纬向风扰动。在 110°W 处产生的扰动向各个方向传播, 其中有一支是向西传的。而在 150°E 附近产生的扰动是与对流活动密切相关的。这种对流的产生除了温度波的作用外, 由 110°W 处向西移动的扰动的激发也是影响因素之一。 150°E 处产生的对流通过 CISK 机制使扰动获得能量并向西北方向传播。

(4) 通过计算整层大气积分的非绝热加热 Q_1 和水汽汇 Q_2 发现, 在东太平洋 Q_1 有越赤道现象, 这就进一步证实了赤道上的加热强迫是产生西传低频波的主要原因。在 150°E 及以西地区 Q_2 与低频波的传播方向一致, 都是向西北传播的, 而 Q_1 的传播不明显, 这说明该处的波动是一种以潜热加热为主的波动。而在 110°W 处产生的波向周围各个方向传播, 与热源的移动没有一致关系, 因此这两种波动的性质是不一样的。

参 考 文 献

- [1] Madden, R. A., and P. R. Julian, Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702—708, 1971.
- [2] Lorenc, A. C., The evolution of planetary scale 200 mb divergences during the FGGE year, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **110**, 427—441, 1984.
- [3] Krishnamurti, T. N., R. K. Jayakumar, J. Sheng, N. Surgi and A. Kumar, Divergent circulations on the 30 to 50 day time scale, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 364—375, 1985.
- [4] Murakami, T., and T. Nakazawa, Tropical 45 day oscillations during the 1979 northern hemisphere summer, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1107—1122, 1985.
- [5] Murakami, T., L. -X. Chen, A. Xie and M. L. Shrestha, Eastward propagation of 30—60 day perturbations as revealed from outgoing longwave radiation data, *J. Atmos. Sci.*, **43** 1986.
- [6] Lau, N. C., and K. M. Lau, The structure and propagation of intraseasonal oscillations appearing in a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2023—2047, 1986.

WESTWARD PROPAGATION OF 40-DAY LOW-FREQUENCY OSCILLATION OVER THE EQUATORIAL REGION

Lu Hongzhong Zhang Xiangong Ding Yihui

(Academy of Meteorological Science, State Meteorological Administration)

Abstract

The characteristic features of westward propagating 40-day low-frequency oscillations over the equatorial region during the period of July-December 1981 are analyzed by using the band-pass filter and EOF composite technique. The results show that the cross-equatorial 40-day temperature waves over the eastern Pacific are mainly responsible for the formation of the westward propagating modes. There are two main sources for these modes. The one is in the vicinity of 150°E at equator. The other is in the vicinity of 110°W at equator. The low-frequency disturbances formed in these two places are different from each other. The results of vertically integrated heat source Q_1 and moisture Q_2 show that the Q_1 heating centres propagate across the equator over eastern Pacific, which is in good agreement with the propagation of the cross-equatorial temperature waves. The Q_2 heating centres seem to originate from around 150°E at equator and move northwestward.