

热带大气周期性振荡相图结构与 南北半球中纬度热力强迫效应的相关关系*

徐 祥 德

(天津市气象局, 300074)

提 要

本文根据反映热带大气运动的动力系统数学模型, 将热带大气周期性振荡产生条件归纳为动力系统相图椭圆型结构形成问题. 本文强调了南北半球中纬度冷暖空气活动对赤道地区热力结构的强迫效应, 探讨了此类赤道地区外界热力强迫对热带大气运动周期性振荡形成的作用. 本文还讨论了与非周期运动相关的动力系统相图椭圆型结构破坏问题及其相图抛物型、双曲型构成前提条件, 并研究了各类相图几何图形特征点与大气运动状态的联系. 本文研究还表明, 南北半球中纬度冷暖空气活动即使属非周期扰动, 若满足动力系统相图椭圆型条件, 也可引起赤道地区的高频或低频周期性振荡.

关键词: 相图结构; 中纬斜压扰动; 热带大气周期振荡.

一、引 言

近年来, 寻找启动热带地区大气周期性振荡的触发因素也是一个令人瞩目的课题. Charney (1969) 提出一种观点, 认为中纬度的影响可以驱动或启动低纬度的大气扰动, 并研究出波动穿过纬向平均基流而传播的判据. 大量观测事实也表明, 中纬度扰动能够深入低纬、赤道地区, 有时还可穿过这些地区而进入另一半球的中纬度区域. 关于中纬扰动对低纬地区大气波动的激发效应问题, Yasunari^[1] 发现, 印度地区大气垂直结构受到 40 天周期的云量异常向北位相漂移的影响而逐渐变化, 且此类高、低空异常环流向东、向北准周期性传播特征与南半球冷空气活动及南半球西风波斜压扰动的触发作用有密切联系. Murakami^[2] 认为赤道低频扰动主要是被北半球和南半球副热带与中纬地区 30—60 天准周期性经向冷涌所强迫. 本文认为对于热带大气周期性振荡而言, 除了热带地区东西风带分布特征、流场辐合辐散效应、非绝热加热垂直结构以及科里奥利参数诸因素外, 南北半球中纬度冷暖空气活动及由其引起的赤道地区热力强迫也是热带大气扰动的重要启动因素. 本文试图将热带大气周期性振荡产生条件归纳为动力系统相图结构形成问题, 进而研究热带大气周期性振荡形成机制, 揭示热带大气高频或低频振荡的影响因素. 本文强调了热带大气动力系统相图结构与热带地区基流分布、加热场特征等因子及其南北半球中纬地区热力强迫效应的相关关系, 且通过相空间几何图形的特征差异来直观地分析研究热带大气周期性振荡的条件.

1989 年 11 月 25 日收到, 1990 年 8 月 14 日收到再改稿.

* 国家自然科学基金和国家气象局季风科研基金资助项目.

二、数 学 模 型

本文采用如下数学模型来研究热带大气周期性振荡的影响因子,引入的基本运动方程、热力学方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u = f v - \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v = -f u - \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = - \frac{RT}{p}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T - \omega \sigma_s = \frac{\dot{Q}}{c_p}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{v}_h = - \frac{\partial \omega}{\partial p}. \quad (5)$$

对于赤道地区,科里奥利力 $f \approx \beta y$, 且实际温度场分布均匀,根据热带大气运动特征,经尺度分析^[3],热流量方程(4)可化简为

$$\omega \sigma_s \approx - \frac{\dot{Q}}{c_p}, \quad (6)$$

其中 σ_s 为层结稳定度系数.

实际观测资料的分析表明,低纬大气低频振荡特征也可表现为经(纬)圈环流或高、低空异常环流(风场垂直切变)向东和向北准周期性传播.这说明低纬周期性振荡特征可能是多种形式的.本文选取风场垂直切变作为研究热带大气周期性振荡的物理量,即

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v}{\partial p} \\ \frac{\partial u}{\partial p} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

利用静力方程、状态方程以及热带地区非绝热加热因子与垂直运动的相关关系,并对上述方程采用线性化处理,且在相应平流项中保留有关基本气流水平切变与辐散诸项,可得如下动力系统^[4]:

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi}' \\ \dot{\eta}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{a} & \tilde{b} \\ \tilde{c} & \tilde{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi' \\ \eta' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_x' \\ B_y' \end{pmatrix}, \quad (8)$$

其中

$$\begin{pmatrix} \xi' \\ \eta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v'}{\partial p} \\ \frac{\partial u'}{\partial p} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} B_x' \\ B_y' \end{pmatrix} = \frac{R}{p} \begin{pmatrix} \frac{\partial T'}{\partial y} \\ \frac{\partial T'}{\partial x} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\tilde{a} = -\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \dot{Q}^*, \quad \tilde{b} = -\left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right), \quad \tilde{c} = \beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \quad \tilde{d} = -\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \dot{Q}^*, \quad (11)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{1}{c_p \sigma_s} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial p},$$

其中 σ_s 、 $\partial \dot{Q} / \partial p$ 假设为已知的大气加热与层结状态, 即近似常数.

若考虑热带大气尺度分析特征, 将 $\dot{Q}^*$ 与垂直运动 ω 之近似关系代入连续方程, 可知基本气流的辐散场与非绝热量 $\dot{Q}^*$ 之间量级近似, 即

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \approx \alpha^* \dot{Q}^*, \quad (12)$$

其中 α^* 为常数, (12) 式仅为量级分析所得近似关系, 这与 Chang 等^[5] 提出的加热函数表达式类似.

另外, 动力系统 (8) 中 B_x' 、 B_y' 反映了通过赤道地区边界南北半球中纬系统对赤道地区热力结构的强迫扰动.

三、动力系统相路方程

对于热带大气波动的研究, 李崇银^[6] 将基本气流垂直切变引入了 CISK 模式, 得到了一种缓慢移动的 CISK 波. 本文试图通过动力系统 (8), 研究系数矩阵参数 $\tilde{a}$ 、 $\tilde{b}$ 、 $\tilde{c}$ 、 $\tilde{d}$ 有关各类因素对热带大气振荡特征的影响问题. 由动力系统 (8) 可得如下相路方程:

$$\frac{\xi'}{\eta'} = \frac{\tilde{a}\xi' + \tilde{b}\eta' + B_x'}{\tilde{c}\xi' + \tilde{d}\eta' + B_y'}, \quad (13)$$

$$\frac{d\xi}{d\eta} = \frac{\tilde{a}\xi' + \tilde{b}\eta' + B_x'}{\tilde{c}\xi' + \tilde{d}\eta' + B_y'}, \quad (14)$$

$$\tilde{c}d\left(\frac{\xi'^2}{2}\right) - \tilde{b}d\left(\frac{\eta'^2}{2}\right) + \tilde{d}\eta'd\xi' - \tilde{a}\xi'd\eta' + B_y'd\xi' - B_x'd\eta' = 0. \quad (15)$$

若考虑热带大气非绝热加热与辐散流型效应相平衡, 即类似文献 [5] 中有关加热函数 $\dot{Q}$ 与 $\nabla \cdot \bar{v}_h$ 之间的关系, 或者暂不考虑非绝热加热因素, 假定大气为无辐散耦合流型. 利用本文 (13) 式近似关系, 取 $\tilde{a} = -\tilde{d}$, 则相路方程可得更为简便的形式, 即

$$\tilde{c}d\left(\frac{\xi'^2}{2}\right) - \tilde{b}d\left(\frac{\eta'^2}{2}\right) + \tilde{d}d(\xi'\eta') + B_y'd\xi' - B_x'd\eta' = 0, \quad (16)$$

或

$$\tilde{c}d\left(\frac{\xi'^2}{2}\right) - \tilde{b}d\left(\frac{\eta'^2}{2}\right) - \tilde{a}d(\xi'\eta') + B_y'd\xi' - B_x'd\eta' = 0. \quad (16)'$$

积分方程 (16), 可得

$$A\xi'^2 + B\eta'^2 + C\xi'\eta' + D\xi' + E\eta' + C_0 = 0, \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{2} \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right), \quad B = \frac{1}{2} \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \\
 C &= \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \dot{Q}^* \quad \text{或} \quad C = -\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \dot{Q}^*, \\
 D &= \frac{R}{p} \frac{\partial T'}{\partial x}, \quad E = -\frac{R}{p} \frac{\partial T'}{\partial y},
 \end{aligned} \tag{18}$$

C_0 为积分常数.

由 (17) 式可知, 热带大气运动在一定条件下, 其动力系统相路可转化为二次曲线形式的代数方程. 因此, 对热带大气周期性振荡的能否产生, 即可归结为相轨迹二次曲线类型的判别问题.

对于相轨迹二次曲线类型的判别条件, 可引入不变量参数, 即

$$\tilde{D}^* = \begin{vmatrix} A & \frac{C}{2} & \frac{D}{2} \\ \frac{C}{2} & B & \frac{E}{2} \\ \frac{D}{2} & \frac{E}{2} & C_0 \end{vmatrix}, \quad \tilde{\delta}^* = \begin{vmatrix} A & \frac{C}{2} \\ \frac{C}{2} & B \end{vmatrix}, \quad \tilde{S}^* = A + B. \tag{19}$$

四、热带大气周期性振荡相轨迹椭圆型条件判据

本文引出的相路曲线类型判别条件可归纳如下:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\delta}^* > 0 \text{ (椭圆型)} & \begin{cases} \tilde{D}^* \cdot \tilde{S}^* < 0, & \text{椭圆} \\ \tilde{D}^* \cdot \tilde{S}^* > 0, & \text{虚椭圆 (无轨迹)} \\ \tilde{D}^* = 0, & \text{点 (一对虚直线)} \end{cases} \\
 \tilde{\delta}^* = 0 \text{ (抛物型)} & \begin{cases} \tilde{D}^* \neq 0, & \text{抛物型} \\ \tilde{D}^* = 0, & \text{直线} \end{cases} \\
 \tilde{\delta}^* < 0 \text{ (双曲型)} & \begin{cases} \tilde{D}^* \neq 0, & \text{双曲线} \\ \tilde{D}^* = 0, & \text{相交两直线} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{20}$$

以上相图类型如图 1 所示

为了简化起见, 略去积分常数 C_0 . 相轨迹类型不变量 $\tilde{D}^*$, $\tilde{S}^*$, $\tilde{\delta}^*$ 与低纬东西风切变; 经向、纬向气流辐散辐合特征; 非绝热加热场结构以及 β 因子的相关关系可写为如下系数矩阵:

$$\tilde{D}^* = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \dot{Q}^* \right) & \frac{R}{2p} \frac{\partial T'}{\partial x} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \dot{Q}^* \right) & \frac{1}{2} \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) & -\frac{R}{2p} \frac{\partial T'}{\partial y} \\ \frac{R}{2p} \frac{\partial T'}{\partial x} & -\frac{R}{2p} \frac{\partial T'}{\partial y} & 0 \end{vmatrix},$$

$$\tilde{\delta}^* = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \dot{Q}^* \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \dot{Q}^* \right) & \frac{1}{2} \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \end{vmatrix}, \quad (21)$$

$$\tilde{S}^* = \beta y + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right).$$

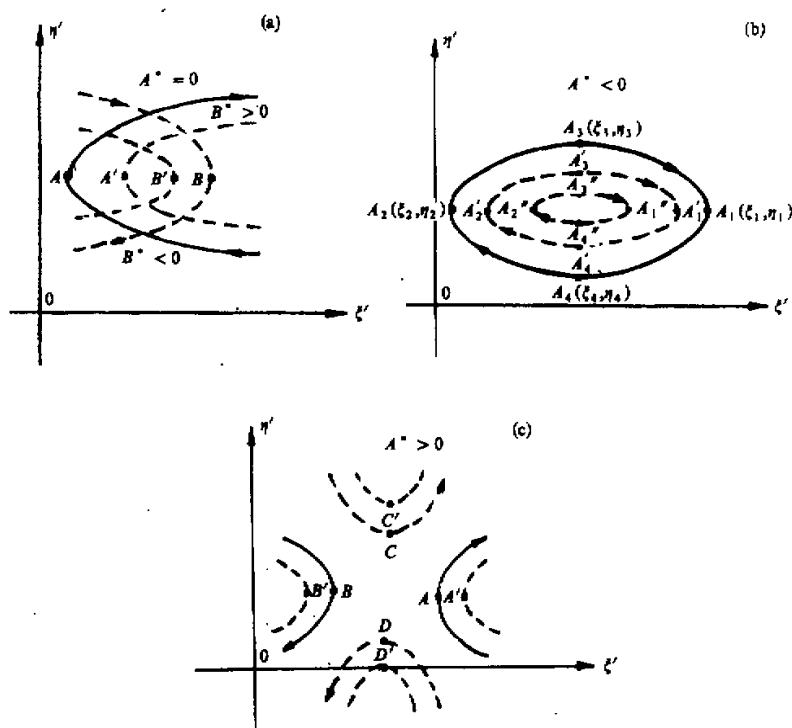


图 1 相图类型

(a) 抛物型, (b) 椭圆型, (c) 双曲型.

于是可得

$$\begin{aligned} \tilde{D}^* = & -\frac{R^2}{8p^2} \left[2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \dot{Q}^* \right) \frac{\partial T'}{\partial x} \frac{\partial T'}{\partial y} + \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (22)$$

$$\tilde{\delta}^* = \frac{1}{4} \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \dot{Q}^* \right)^2.$$

由(21)式可知,反映热带大气运动相轨迹特征的不变量参数 $\tilde{D}^*$ 、 $\tilde{\delta}^*$ 、 $\tilde{S}^*$ 的相关因子各有差异,尤其 $\tilde{D}^*$ 参数还取决于南北半球中纬度冷暖空气活动对于赤道地区的热力强迫状况,即

$$\begin{pmatrix} \tilde{D}^* \\ \tilde{\delta}^* \\ \tilde{S}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{D}^* \left(T'_x, T'_y, \bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{v}_x, \bar{v}_y, \beta, \frac{\partial \dot{Q}}{\partial p}, \frac{\partial \sigma_s}{\partial p}, \dot{Q} \right) \\ \tilde{\delta}^* \left(\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{v}_x, \bar{v}_y, \beta, \frac{\partial \dot{Q}}{\partial p}, \frac{\partial \sigma_s}{\partial p}, \dot{Q} \right) \\ \tilde{S}^* (\bar{u}_y, \bar{v}_x, \beta) \end{pmatrix} \quad (23)$$

若假设

$$\bar{\zeta}_1 = \beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \quad \bar{\zeta}_2 = \beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}, \quad \bar{D}_1 = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad \bar{D}_2 = \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, \quad (24)$$

上述 $\bar{\zeta}_1$ 、 $\bar{\zeta}_2$ 代表热带地区旋转流型特征; $\bar{D}_1$ 、 $\bar{D}_2$ 代表辐散流型特征.则由判据(20)可得相轨迹椭圆型条件为

$$\bar{\zeta}_1 \cdot \bar{\zeta}_2 > (\bar{D}_1 - \dot{Q}^*)^2, \quad (i=1, 2) \quad (25)$$

以及

$$\left[2(\bar{D}_1 - \dot{Q}^*) \frac{\partial T'}{\partial x} \frac{\partial T'}{\partial y} + \bar{\zeta}_2 \left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 + \bar{\zeta}_1 \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 \right] (\bar{\zeta}_1 + \bar{\zeta}_2) > 0, \quad (i=1, 2) \quad (26)$$

即

$$\begin{aligned} & 2(\bar{D}_1 - \dot{Q}^*) (\bar{\zeta}_1 + \bar{\zeta}_2) \frac{\partial T'}{\partial x} \frac{\partial T'}{\partial y} + \bar{\zeta}_2^2 \left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 + \bar{\zeta}_1^2 \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 \\ & + \bar{\zeta}_2 \bar{\zeta}_1 \left[\left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 \right] > 0, \quad (i=1, 2) \end{aligned} \quad (27)$$

五、热带大气周期性振荡形成机制及其相轨迹讨论

由相轨迹椭圆型条件(25)可见,热带大气周期性振荡的形成与低纬旋转流型因素 $\bar{\zeta}_1$ 或 $\bar{\zeta}_2$ 、辐散流型因素 $\bar{D}_1$ 或 $\bar{D}_2$ 以及非绝热加热状况均有关,即若旋转流场有关交叉项 $(\bar{\zeta}_1 \bar{\zeta}_2)$ 大于辐散流型与加热项的组合 $(\bar{D}_1 - \dot{Q}^*)^2$,则可能导致动力系统呈椭圆型相轨迹,于是形成周期性振荡.

由(27)式可知,椭圆型相迹的第二条件不仅与旋转流型动能、拟能($\bar{\zeta}_1^2$ 或 $\bar{\zeta}_2^2$)以及辐散流型($\bar{D}_1$ 或 $\bar{D}_2$)相关,而且与中纬度冷暖空气活动对赤道地区热力扰动因素 $(\partial T' / \partial x$ 或 $\partial T' / \partial y)$ 有显著联系.

南北半球中纬度冷暖空气活动对热带地区热力强迫的扰动类型可以有多类形势,其中包括中纬与热带边界的温度波动,即冷槽、暖脊;有时则可形成切断冷、暖中心扰动结构.例如,北半球中纬冷槽系统对热带地区的热力强迫,在其冷槽前部温度场梯度 $\partial T' / \partial x > 0$, $\partial T' / \partial y < 0$,两者反号;冷槽后部 $\partial T' / \partial x < 0$, $\partial T' / \partial y < 0$,则两者同号.即在(27)式中 $\partial T' / \partial x$ 、 $\partial T' / \partial y$ 的配置关系可有显著差异.

为了简化问题, 若假设

$$\left| \frac{\partial T'}{\partial x} \right| \approx \left| \frac{\partial T'}{\partial y} \right|, \quad (28)$$

且令

$$\frac{\partial T'}{\partial x} = \delta \frac{\partial T'}{\partial y} = \delta \frac{\partial T'}{\partial s}, \quad (29)$$

其中

$$\delta = \begin{cases} 1, & \frac{\partial T'}{\partial x} \text{ 与 } \frac{\partial T'}{\partial y} \text{ 同号 (冷槽后部或切断冷、暖中心)} \\ -1, & \frac{\partial T'}{\partial x} \text{ 与 } \frac{\partial T'}{\partial y} \text{ 异号 (冷槽前部)} \end{cases}$$

将(29)式代入(27)式, 可得

$$\delta(\overline{D}_i - \dot{Q}^*)(\overline{\zeta}_1 + \overline{\zeta}_2) \left(\frac{\partial T'}{\partial s} \right)^2 + (\overline{\zeta}_1^2 + 2\overline{\zeta}_1\overline{\zeta}_2 + \overline{\zeta}_2^2) \left(\frac{\partial T'}{\partial s} \right)^2 > 0, \quad (30)$$

即

$$\delta(\overline{D}_i - \dot{Q}^*)\zeta^* + \zeta^{*2} > 0$$

或

$$[\delta(\overline{D}_i - \dot{Q}^*) + \zeta^*]\zeta^* > 0, \quad (i=1, 2) \quad (31)$$

其中 $\zeta^* = \overline{\zeta}_1 + \overline{\zeta}_2$.

由上述推导结果可知, 若满足相轨迹椭圆条件(25)后, 对于与中纬冷暖空气热力强迫扰动相关的热带大气周期性振荡条件可写为

$$\begin{aligned} \delta=1 \quad \frac{\partial T'}{\partial x} \text{ 与 } \frac{\partial T'}{\partial y} \text{ 同号} & \begin{cases} \zeta^* < 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* < 0 & \text{周期性振荡} \\ \zeta^* > 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* > 0 & \text{周期性振荡} \\ \zeta^* < 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* > 0 & \begin{cases} |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| < |\zeta^*| & \text{(旋转流型为主) 周期性振荡} \\ |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| > |\zeta^*| & \text{非周期性振荡} \end{cases} \\ \zeta^* > 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* < 0 & \begin{cases} |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| < |\zeta^*| & \text{(旋转流型为主) 周期性振荡} \\ |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| > |\zeta^*| & \text{非周期性振荡} \end{cases} \end{cases} \\ & (i=1, 2) \quad (32) \\ \delta=-1 \quad \frac{\partial T'}{\partial x} \text{ 与 } \frac{\partial T'}{\partial y} \text{ 异号} & \begin{cases} \zeta^* < 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* > 0 & \text{周期性振荡} \\ \zeta^* > 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* < 0 & \text{周期性振荡} \\ \zeta^* < 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* < 0 & \begin{cases} |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| < |\zeta^*| & \text{(旋转流型为主) 周期性振荡} \\ |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| > |\zeta^*| & \text{非周期性振荡} \end{cases} \\ \zeta^* > 0, \overline{D}_i - \dot{Q}^* > 0 & \begin{cases} |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| < |\zeta^*| & \text{(旋转流型为主) 周期性振荡} \\ |\overline{D}_i - \dot{Q}^*| > |\zeta^*| & \text{非周期性振荡} \end{cases} \end{cases} \end{aligned}$$

由 (30)、(32) 式可知, 中纬度冷空气活动对赤道地区热力扰动是相轨迹椭圆型结构特征形成的重要条件. 对于不同热力扰动结构特征 (即 $\partial T' / \partial x$ 与 $\partial T' / \partial y$ 的相互配置) 满足周期性振荡条件的旋转流场结构 (高、低压系统) 与辐散辐合流场状况、非绝热加热场特征三者的相互配置关系大有差异. 另外, 若无热力扰动因素, 可使 $\bar{D}^* = 0$, 则相轨迹退化为点 (一对虚直线), 即不存在椭圆轨迹 (见判据 (20) 式).

若热带地区无非绝热加热 ($\bar{Q}^* = 0$), 且为无辐散流型 ($\bar{D}_i = 0, i = 1, 2$), 由 (25)、(27) 式可知, 若 $\bar{\zeta}_1$ 与 $\bar{\zeta}_2$ 同号, 只要存在赤道地区热力扰动, 总可产生热带大气周期振荡, 即椭圆型相轨迹. 故如下不等式关系恒成立 (即满足 (25)、(27) 式判据):

若 $\bar{\zeta}_1$ 与 $\bar{\zeta}_2$ 同号, 且不为零, 则

$$\bar{\zeta}_1 \bar{\zeta}_2 > 0, \quad (33)$$

$$\bar{\zeta}_2^2 \left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 + \bar{\zeta}_1^2 \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 + \bar{\zeta}_1 \bar{\zeta}_2 \left[\left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 \right] > 0.$$

以上结论进一步证实了 Yasunari 等提出的, 印度地区、低纬赤道地区云量异常及其高、低空异常环流向东、向北准周期性传播特征均与南半球冷空气活动或西风波斜压扰动的触发作用相联系.

由相轨迹类型判据 (20) 可知, 若

$$(\bar{D}_i - \bar{Q}^*)^2 \geq \bar{\zeta}_1 \bar{\zeta}_2, \quad (i = 1, 2) \quad (34)$$

则相轨迹为抛物型、双曲型、直线型, 即与上述椭圆型有实质上的差异, 热带大气运动表现为非周期振荡特征.

若假设

$$\begin{pmatrix} \bar{\zeta}_1 \\ \bar{\zeta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta y \\ \beta y \end{pmatrix}, \quad (35)$$

即略去旋转流场有关项, 则判据 (25)、(27) 可写为

$$(\beta y)^2 > (\bar{D}_i - \bar{Q}^*)^2, \quad (36)$$

$$2\beta y (\bar{D}_i - \bar{Q}^*) \frac{\partial T'}{\partial x} \frac{\partial T'}{\partial y} + (\beta y)^2 \left[\left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 \right] > 0.$$

上式反映了科里奥利参数因子与诸因素 (热力扰动、辐散状况、非绝热加热) 相互配置关系对低纬大气周期振荡的重要影响.

Chen^[7] 指出, 低空季风环流的 40—50 天振荡本质上可用旋转流型来描述. 由上述椭圆型相轨迹条件 (25) 及 (32) 可见, 旋转流型显著程度对于低纬周期性振荡的形成起了关键性作用, 即旋转流型越显著, 越有利于形成热带大气周期性振荡; 相反, 当辐合辐散流型与非绝热加热特征显著时, 则有利于形成热带大气非周期振荡 (即相轨迹呈抛物型、双曲型、甚至直线型). 但必须指出的是椭圆型相轨迹条件不仅包含旋转、辐散流型及加热效应的显著程度 (诸项绝对值的大小), 而且包括了诸因素的状态特征 (这里指旋转方向、辐散辐合特征及其加热结构, 即各项的正负符号), 因此热带大气振荡周期性特征的形成还与上述诸因素的相互配置有密切关系 (见 (32) 式). 另外, 中纬冷

空气活动对热带地区热力扰动又是热带大气周期性振荡的基本触发因子, 同时热力扰动结构与其它诸因素的配置关系也是影响热带大气振荡特征的不可忽视的重要原因。

六、相轨迹几何图形特征点

上述推导将热带大气周期性振荡产生归结为动力系统相轨迹椭圆型特征, 通过相空间几何图形差异可直观地分析研究周期性振荡的成因。

若对相图曲线函数求极值, 可得各类型相迹的极值特征点, 即

$$\frac{\partial L(x_1, x_2)}{\partial x_i} = 0, \quad (i=1, 2) \quad (37)$$

其中 $L(x_1, x_2)=0$ 为相空间曲线。

这里将相轨迹极值点作为动力系统沿相路移动的端点(变化范围)。

为了简化问题, 将相路方程(16)积分形式略去 $\xi' \eta'$ 交叉乘积项, 写为

$$\frac{\tilde{C}}{2} \xi'^2 - \frac{\tilde{b}}{2} \eta'^2 + B_y' \xi' - B_x' \eta' + C_0 = 0. \quad (38)$$

略去积分常数 C_0 , 相轨迹方程写为

$$(\eta' - \eta_0')^2 = A^* \xi'^2 + B^* \xi' + C_0^*, \quad (39)$$

即

$$\eta^{*2} = A^* \xi'^2 + B^* \xi' + C_0^*, \quad (40)$$

其中

$$\eta^* = \eta' - \eta_0', \quad A^* = \frac{\tilde{C}}{b}, \quad B^* = \frac{2B_y'}{b}, \quad (41)$$

$$C_0^* = \frac{B_x'^2}{b^2}, \quad \eta_0' = -\frac{B_x'}{b}.$$

若 $A^*=0$, 即 $\tilde{C}=0$, 相轨迹为抛物型(图 1a), 抛物线极值点分为两类情况:

若 $\tilde{C}=0$, 即 $\beta y - \partial \bar{u} / \partial y = 0$, 则

$$\frac{2B_y'}{\tilde{b}} = \frac{R}{p} \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\left(-\beta y - \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)} > 0, \quad \frac{\partial v'}{\partial p} \begin{cases} \text{极小值 } A \left(-\frac{B_x'^2}{B_y' \tilde{b}}, -\frac{B_x'}{\tilde{b}} \right) \\ \text{极大值 } B \left(-\frac{B_x'^2}{B_y' \tilde{b}}, -\frac{B_x'}{\tilde{b}} \right) \end{cases}, \quad (42)$$

由(42)式可知, 若 $\tilde{C}=0$, 则赤道地区 $\partial v' / \partial p$ 的极值与旋转流型、中纬热力强迫均有关。扰动风场垂直切变的演变过程与流场、温度场配置相关。不同的配置关系可以导致动力系统发展或抑制的显著差异。

若 $A^*<0$, 即 $\tilde{C}/\tilde{b}<0$, 相轨迹为椭圆型。这意味着大气周期性振荡的存在与维持。若在赤道地区 $\beta y \approx 0$, 其前提条件是旋转流型存在, 且 $\partial \bar{u} / \partial y$ 与 $\partial \bar{v} / \partial x$ 呈反相关关系。

本文利用相图极值点的判别形式, 描述出热带大气周期性振荡运动状态的范围及其演变特征, 且着眼于相图几何图形特征点与大气运动状态之间的相互联系。

假设相轨迹椭圆曲线四个端点为

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1(\xi'_1, \eta'_1) \\ A_2(\xi'_2, \eta'_2) \\ A_3(\xi'_3, \eta'_3) \\ A_4(\xi'_4, \eta'_4) \end{pmatrix}, \quad (43)$$

这里必须指出的是, 对于相轨迹椭圆型 ($A^* < 0$) 或者双曲型 ($A^* > 0$), 它们四个端点坐标与诸影响因素的关系均可写为如下形式, 其关键的差异在于 A^* 参数正负号的区别.

$$\begin{aligned} \xi'_{1,2} &= \frac{R \left[-\frac{\partial T'}{\partial x} \pm \sqrt{\left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 + \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 / \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)} \right]}{p \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)}, \\ \eta'_{1,2} &= \frac{R \frac{\partial T'}{\partial y}}{p \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)}, \\ \xi'_{3,4} &= -\frac{R \frac{\partial T'}{\partial x}}{p \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)}, \\ \eta'_{3,4} &= \pm \frac{R}{p \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)} \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial T'}{\partial y} \right)^2 \left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial T'}{\partial x} \right)^2 \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)}{\left(\beta y - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)}} + \frac{R \frac{\partial T'}{\partial y}}{p \left(\beta y + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)}. \end{aligned} \quad (44)$$

($\xi'_{1,2}, \eta'_{1,2}$), ($\xi'_{3,4}, \eta'_{3,4}$) 分别为相轨迹椭圆长、短轴端点坐标 (图 1b), 它们反映了 $\partial u' / \partial p$, $\partial v' / \partial p$ 物理量在椭圆型相路特征的周期性演变过程中的变化范围与热带地区基流分布, 与中纬冷暖空气活动的热力强迫效应及其 β 因子均有显著相关.

若 $A^* > 0$, 相轨迹为双曲型 (图 1c), 其相图表明, 此情况下大气运动并不存在周期性振荡, 有关讨论从略.

本文研究了启动热带大气周期性振荡的触发因素, 并将热带大气周期性振荡产生条件归纳为动力系统相图椭圆型结构形成问题.

研究结果发现, 南北半球中纬度冷暖空气活动对赤道地区热力强迫效应是热带大气形成周期性振荡的基本触发因子之一, 热力扰动相关的温度场分布特征与热带大气流场类型、非绝热加热场结构的相互配置关系也是热带大气周期性振荡成因的关键环节. 例如, 与中纬斜压扰动相关的热带地区温度波动 (冷槽、暖脊、冷暖扰动中心) 可能激发低纬大气周期性振荡. 本文还讨论了相图椭圆型结构形成与破坏问题及其抛物型、双曲型等各类相图几何特征点与大气动力、热力状况的相关关系. 本文对热带大气动力系统相

图结构以及椭圆型相轨迹判据条件的研究揭示了热带大气周期性振荡的成因及其影响因素。

参 考 文 献

- [1] Yasunari, T., 1981, Structure of an Indian monsoon system with around 40-day period. *J. Meteor. soc. Japan*, **59** (3), 336—354.
- [2] Sumathipale W. L. and T. Murakami, 1987, The role of low-level northerly surges upon the enhancement of 30–60-day equatorial oscillations during winter, UHMET 87–10, Dept. of Meteorology, Univ. of Hawaii.
- [3] 伍荣生等, 1983, 动力气象学, 上海科技出版社, 163—168.
- [4] Xu Xiangde, He Jinhai and Zhu Qiangen, 1990, A dynamical analysis of basic factors of low-frequency Oscillation in the tropical atmosphere, *Acta Meteorologica Sinica*, **4**, No. 2, 157—167.
- [5] C. -P. Chang and H. Lim, 1988, Kelvin wave-CISK: A possible mechanism for the 30–50-day Oscillation, *J. Atmos. Sci.* **45**, No. 11, 1709—1719.
- [6] 李崇银, 1985, 南亚夏季风槽脊和热带气旋活动与移动性 CISK 波, 中国科学 B 辑, 第 7 期, 668—675.
- [7] Chen, T. C., 1986, The 40–50-day Oscillation of the low-level monsoon circulation over the Indian ocean, *Mon. Wea. Rev.*, **114** (12), 2550—2570.

Correlations Between the Phase Diagram Structures of Periodic Oscillations in the Tropical Atmosphere and Thermal Forcing From Midlatitudes of the Southern and Northern Hemispheres

Xu Xiangde

(Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin, 300074)

Abstract

Based on a mathematic model of the dynamic system of the tropical atmospheric motion, the cause of periodic oscillations is attributed to the elliptic condition of phase diagram of the dynamical system. The current research emphasizes the effects of cold and warm air activities from midlatitudes of the Southern and Northern Hemispheres on thermal structure of the atmosphere over tropical area, and explores the effect of those external thermal forcing on the formation of in the periodic oscillations tropical atmosphere.

Key words: Structure of phase diagram; Periodic oscillations of the tropical atmosphere.