

热带大气能量频散波射线的低频动力学特征^{*}

徐祥德 苗秋菊

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

首先在非零频波条件下采用有、无辐散两类数学模型, 讨论热带大气低频波传播动力特征, 研究表明, 非零频的波频率参数是热带大气低频振荡源能量频散波路径及其波振幅的关键影响因子, 且热带地区低频振荡的经向传播与其伴随着的强对流云团有显著相关, 并与热带低纬因子等相关。文中还进一步揭示了低纬大气低频振荡经向传播伴随的积云对流现象及向高中纬传播机理, 描述了 WKB 近似方法数学模型及其波射线方程解模态对大气低频动力特性及其水汽分布垂直结构、不稳定层结等因子的响应特征。

关键词: 热带, 非零频波, 低频, 波射线, WKB 近似。

1 引 言

中高纬大气对外源强迫, 尤其是热带海表温度 SST 异常等低纬强迫因子, 可存在明显的遥响应, 数值试验结果表明, 低纬热源强迫会在中高纬产生较强的大气遥响应, 而位于中高纬地区热源强迫在热带大气中却不能激发出强响应^[1]。这结论揭示出外源强迫在低纬地理位置的重要作用; 另外, 大气对外源强迫的遥响应机制及其传播的频率结构亦是值得探讨的领域, 例如为何热带地区低频振荡存在显著的向北经向传播特征? 其遥响应动力结构与频率特征是否相关?

近年, 有关学者引出了遥响应(remote response)的概念, 并提出遥相关的经向传播特征, Hoskins 等为此首先提出了大圆理论, 即波射线及其 WKB 近似解析方法。但若仅采用以往文献中零频波的假设($\omega = 0$), 将限制了波频率对波射线及其振幅影响特征的讨论“领域”, 因此将难以解释低纬地区低频波向高纬传播现象及成因等问题, 本文采用有辐散与无辐散条件两类数学模型, 着眼于非零频波条件($\omega \neq 0$), 探讨波频率结构对波列路径特征及其波振幅形态的影响, 并且强调了对于低纬地区低频波向极地传播的可能性以及影响中纬环流的赤道低频波源等问题的讨论。

关于低频振荡的地理分布、季节变化、动力结构、产生源地及其机理等方面国内外许

初稿时间: 1997 年 3 月 10 日; 修改稿时间: 1998 年 12 月 8 日。

资助课题: 国家自然科学基金 95 重大项目“淮河流域能量水分循环试验和研究项目”和国家攀登-B 项目“青藏高原地-气系统物理过程及其对全球气候和中国灾害性天气影响的观测和理论研究”。

多学者进行了大量的研究^[2~5]。中低纬地区季风变动对南亚和东亚地区的天气气候有着极为重要的影响效应, 季风中的 30~60d 振荡往往影响江淮、华北等地区汛期降水量, T. N. Krishnamurti 等^[6]的研究表明, 30~50 天振荡脊线或槽线移动与季风活动、东亚地区降水分布呈显著相关关系。

根据大量观测资料的分析研究, 可以发现南亚季风区和赤道西太平洋地区有较强的热带大气 30~60d 低频振荡的频繁活动。李崇银等指出, 在全球热带地区, 30~60d 振荡的动能分布主要有 4 个大值区: 赤道东太平洋地区(160~100 W)动能最大, 其次为南亚热带地区(50~120 E)和赤道西太平洋(140~150 E), (20 W~0°)地区亦有相当强的扰动动能。而南亚季风区和赤道西太平洋地区为积云对流活动最强的地区^[7]。这说明低频振荡的形成及其传播可能与热带环境与地理因素、海洋异常强迫及积云对流活动存等在显著的相关关系。

观测事实亦表明, 热带地区作为“低频振源”或“转运站”存在十分明显的向北经向传播的动力学特征。热带地区低频振荡活跃特征及其伴随着对流云团向北经向传播的现象, 某种程度上意味着二维 Rossby 波频散或 WKB 近似解数学模型中频率特征及其环境热力结构在波传播过程占有特殊重要的影响地位, 即经向传播的波频率优势以及低纬特定非绝热、强对流活跃的地理环境的有利的触发机制, 这些动力参数(包括因子等)及环境热力背景可能是热带大气低频活动及其经向传播现象的关键环节。如图 1 所示, PJ 型遥相关揭示出菲律宾周围海域的对流异常及其低纬动力特征所激发的 PJ 型波列^[8]。

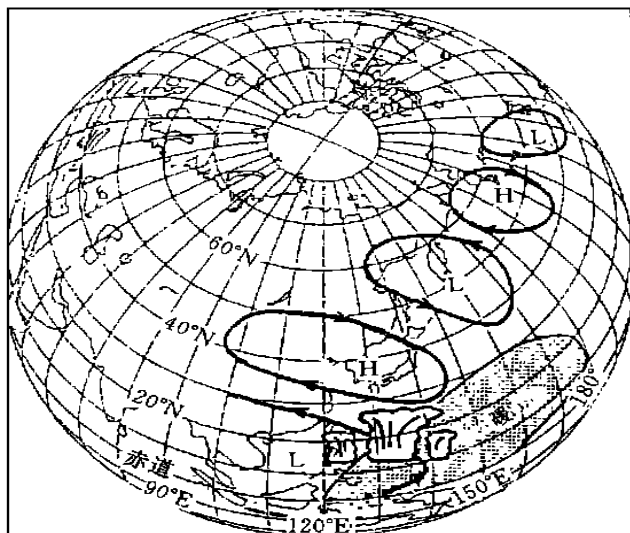


图 1 太平洋—日本 PJ 波列示意图(引自 Nitta, 1987)

本文的研究重点是在二维 Rossby 波频散理论模型中引入了非零频散波($\neq 0$)条件, 探讨低纬大气低频振荡向北传播的物理机制, 研究分析低频振荡源区域性特征与低纬地理因素、积云对流反馈(CISK)、边界层水汽的辐合等诸相关因素。

2 非零频无辐散条件数学模型

若考虑非频散波($\neq 0$)传播特征,即采用如下非零频无辐散条件的涡度方程为:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right)^2 \psi(x, y, t) + \psi(y) \frac{\partial(x, y, t)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

假设

$$\psi = P(y) e^{i(kx - t)}$$

则可得

$$\frac{d^2 P(y)}{dy^2} + \left(\frac{\bar{u}(y)}{\bar{u} - 1/k} - k^2\right) P(y) = 0 \quad (2)$$

令

$$\tilde{a}^2(y) = \frac{\bar{u}(y)}{\bar{u} - 1/k} - k^2$$

令

$$\tilde{p}(y) = e^{\tilde{a}(y)}$$

则方程(2)可写为

$$\tilde{p}'' + \tilde{p}' + \tilde{a}^2(y) \tilde{p} = 0 \quad (3)$$

根据 WKB 近似^[9], 在 $\frac{\tilde{p}''}{\tilde{p}} \ll 1$ 条件下, 式(3)可简化为

$$\tilde{p}' + \tilde{a}^2 \tilde{p} = 0 \quad (4)$$

则方程(1)的解可写为

$$\psi(x, y, t) \approx \tilde{a}^{-1/2}(y) e^{i(kx - t \pm Q_0)} \quad (5)$$

其中 $Q_0 = \int \tilde{a}(y) dy$ 。

由推导的式(5)可知,对于非零频波而言,低频波振幅更为显著。

3 WKB 解近似判据

在低纬地区动力环境与地理特征,考虑非零频波数学模型中 WKB 方法近似条件,

$$\frac{\tilde{p}''}{\tilde{p}} \ll 1 \text{ 等价于 } \frac{d\tilde{a}(y)}{dy} / \tilde{a}^2(y) \leq 1 \quad (6)$$

即

$$\frac{d\tilde{a}^{-1}(y)}{dy} \ll 1$$

其中长度尺度 $\tilde{a}^{-1}(y)$ 是缓变函数,以下讨论该近似条件中低纬地理环境特征的影响。

若假设 $\bar{u} = u_0$, 则

$$\tilde{a}^2(y) = \frac{\bar{u}(y)}{u_0 - 1/k} - k^2 \quad (7)$$

满足 WKB 近似的条件为

$$\frac{d}{dy} \frac{1}{\frac{u_0 - 1/k}{(y) - k^2} (u_0 - 1/k)} \ll 1 \quad (8)$$

满足 WKB 近似不等式判据条件为以下两类情况

$$\pm \frac{d}{dy} \frac{\overline{u_0 - \frac{1}{k}}}{(y) - k^2(u_0 - \frac{1}{k})} = 1$$

即

$$\pm \frac{1}{2} \frac{(u_0 - \frac{1}{k})^{1/2}}{[(y) - k^2(u_0 - \frac{1}{k})]^{3/2}} \frac{d}{dy} = 1 \quad (9)$$

第一类判据:

$$- \frac{1}{2} \frac{(u_0 - \frac{1}{k})^{1/2}}{[(y) - k^2(u_0 - \frac{1}{k})]^{3/2}} \frac{d}{dy} = 1 \quad (10)$$

其中 $u_0 > \frac{1}{k}$, 且 $(y) > k^2(u_0 - \frac{1}{k})$, $\neq k^2(u_0 - \frac{1}{k})$, WKB 近似判据才可能成立; 若 $u_0 < \frac{1}{k}$, WKB 近似判据不成立。

对北半球,

$$\frac{d}{dy} < 0, \text{低纬地区 } (y) \text{ 值较大, 且 } \frac{d}{dy} \Big|_{\text{低纬}} \neq \frac{d}{dy} \Big|_{\text{中、高纬}} \quad (11)$$

由第一类判据可见, 低纬地区与低频波对于上述 WKB 近似条件易成立, 这表明低纬地理区域以及低频波频率特征易满足 WKB 近似条件。

第二类判据:

$$\frac{1}{2} \frac{(u_0 - \frac{1}{k})^{1/2}}{[(y) - k^2(u_0 - \frac{1}{k})]^{3/2}} \frac{d}{dy} = 1 \quad (12)$$

由于北半球 $\frac{d}{dy} < 0$, 则上式 WKB 近似恒成立。

4 非零频有辐散条件数学模型

有关 OLR 资料分析研究结果亦表明, 热带地区有组织的积云对流活动同大气 30~60d 振荡及其活动密切相关, 本文考虑对流凝结加热及其反馈机制是否在低纬大气低频振荡经向运动机理中起着作用, 因此在涡度方程模型中引入了边界层水汽辐合及凝结加热函数的相关项。

考虑类似文献[10]指出暴雨过程水汽辐合主要来源集中于边界层, 假设中层大气积云对流潜热释放主要水汽源为边界层水汽辐合效应, 准地转涡度方程可写为:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}(y) \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 (x, y, p, t) + (y) \frac{\partial (x, y, p, t)}{\partial x} = f_0 \frac{\partial}{\partial p} \quad (13)$$

其中 $\bar{u}$ 反映大尺度平均西风场, 且 $\bar{u} = \bar{u}(y)$ 。

假设非绝热加热是影响大气垂直运动状态的关键因子之一, 两者的关系可表示为

$$\propto - \ast \frac{dQ}{dt} \quad (14)$$

其中 $\frac{dQ}{dt}$ 为非绝热加热率, $\ast$ 为非绝热加热系数, 式(14)亦表现了非绝热加热对垂直运动的反馈效应。

对于凝结潜热释放加热函数可写为

$$\frac{dQ}{dt} = -L \frac{dq_s}{dt} \approx -L_E \frac{q_s}{p} \quad (15)$$

其中 $\frac{dQ}{dt}$ 潜热释放的水汽来源主要强调了边界层抽吸作用的水汽的辐合增量, 而 $\varepsilon \approx \tilde{\varepsilon}$,

且假设 $\frac{q_s}{p}$ 为常数。

其中

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon g (K/2f)^{1/2}$$

因此式 (13) 右端项可写为

$$f_0 \frac{\partial}{\partial p} \approx - \tilde{\varepsilon} L \frac{q_s}{p} \frac{g}{p} \quad (16)$$

$$\text{又令 } \tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon} L \quad \text{则 } f_0 \frac{\partial}{\partial p} = - \frac{q_s}{p} \frac{g}{p} \quad (17)$$

其中 $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon^2$ 。在中低层大气 $\frac{g}{p} < 0$, 即边界层顶及中层涡旋特征强, 边界层内动力涡旋特征弱, 则根据式 (17) 可知, 边界层顶或大气中部垂直上升运动强于近地面低层或边界层内部。

由上述式子可得以下数学模型

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}(y) \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 (x, y, p, t) + (y) \frac{\partial (x, y, p, t)}{\partial x} = - \frac{q_s}{p} \frac{\partial^2 (x, y, p, t)}{\partial p^2} \quad (18)$$

5 热带地区低频特征与波振幅的相关性

假设式 (18) 有如下形式的解令

$$(x, y, p, t) = \tilde{P}(y) e^{i(kx - np - t)}$$

则有

$$\frac{d^2 \tilde{p}}{dy^2} + \tilde{a}^2(y) \tilde{p} = 0 \quad (20)$$

其中

$$\tilde{a}^2(y) = \frac{(y)}{\bar{u}(y) - (w + n \frac{q_s}{p})/k} - k^2 \quad (19)$$

令 $\tilde{P} = e^{\tilde{\gamma}(y)}$, 可得

$$\tilde{\gamma}''(y) + \tilde{\gamma}^3(y) + \tilde{a}^2(y) = 0 \quad (21)$$

根据 WKB 解特征及其近似条件可得

$$\pm i \frac{d}{dy} \left[\frac{(y)}{\bar{u}(y) - (w + n \frac{q_s}{p})/k} - k^2 \right]^{1/2} - \left(\frac{(y)}{\bar{u}(y) - (w + n \frac{q_s}{p})/k} - k^2 \right) = \tilde{\gamma}^4 \quad (22)$$

同理可得解:

$$(x, y, p, t) \approx \tilde{a}^{-1/2}(y) e^{i(kx - np - t \pm Q_0(y))} \quad (23)$$

其中

$$Q_0(y) = \int \tilde{\gamma}(y) dy = \pm \int \frac{(y)}{\bar{u}(y) - (w + n \frac{q_s}{p})/k} - k^2 \right]^{1/2} dy \quad (24)$$

$$\tilde{a}^{-\frac{1}{2}}(y) = \left(\frac{(\gamma)}{\bar{u}(y) - \left(+ n \frac{q_s}{p} \right) / k} - k^2 \right)^{-1/4}$$

由推导的式(23)可知,非零频有辐散数学模型 WKB 近似解振幅与波频率密切相关。波频率越低,波振幅越大,且根据解振幅影响因子的条件:大气层结不稳定($\frac{q}{p} > 0$),且湿度垂直变化弱($\frac{q_s}{p}$ 绝对值小),即呈“水汽柱”型结构,在上述热带地区可能存在的综合环境条件的配置下,低纬低频波振幅将十分显著,这类判据结论与低纬低频源活动频繁现象及其传播现象的观测事实相符。

6 能量频散波低频经向传播特性

对于低频扰动有向极地和向东传播的现象,Hoskins 等采用二维罗斯贝波能量频散,即大圆理论来揭示此类遥相关机理,即将遥相关波列视为零频波($= 0$)的球面二维罗斯贝频散波,本文强调了在非零频波($\neq 0$)条件下波频参数对波能量传播及其波射线特征的影响效应问题。

由波射线定义可将含频率参数的波射线方程写为

$$\frac{dy}{dx} = \frac{C_{gy}}{C_{gx}} = \frac{2 kl / (k^2 + l^2)^2}{\left(+ n \frac{q_s}{p} \right) / k + 2 k^2 / (k^2 + l^2)^2} \quad (25)$$

其中, $L_x > L_y$, 系统纬向尺度大于经向尺度, $\frac{k}{l} < 1$, $\frac{k^2}{l^2} \ll 1$, 则式(25)可简化为:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2}{\left(+ n \frac{q_s}{p} \right) l} \left(\frac{k}{l} \right)^2 \quad (26)$$

若能量频散波显著性北传判据为

$$\frac{dy}{dx} > 1$$

即

$$\frac{2}{\left(+ n \frac{q_s}{p} \right) l} \left(\frac{k}{l} \right)^2 > 1 \quad (27)$$

其中大尺度系统或纬向尺度大的系统,即 $\left(\frac{k}{l} \right)^2 \ll 1$, 显然对于大尺度或行星尺度系统频散波显著性北传条件为

$$\frac{2}{\left(+ n \frac{q_s}{p} \right) l} \gg 1$$

即

$$+ n \frac{q_s}{p} \ll \frac{2}{l} \quad (28)$$

由式(28)判据可发现,对于大尺度或行星尺度系统频散波可能发生经向传播的有利条件

是在纬度低(值大);波频率低(低频值小),大气层结不稳定,且湿度垂直变化弱($\frac{q_s}{p}$ 值小),即大尺度或行星尺度系统在低纬地区的低频波具有显著北传的特征。

假设 $\frac{l}{k} = N$, 则

$$< \frac{2L_y}{N^2 2} - n \frac{q_s}{p} \quad (29)$$

$$\frac{2}{T} < \frac{2}{2} \frac{L_y}{N^2} - n \frac{q_s}{p}, \quad T > 2 / \left(\frac{L_y}{N^2} - n \frac{q_s}{p} \right) \quad (30)$$

假定 $k < l$, 即 $L_x > L_y$, 若取 $L_y \sim 10^7 \text{m}$, $N = 5$, $\sim 2 \times 10^{-11} \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$, 可得

$$T > 30d \quad (31)$$

可见对于强对流不稳定的热带区域, 低频率亦可满足经向传播条件, 即对于大尺度或行星尺度系统可能以大于 30d 低频振荡向北作经向传播, 低纬低层水汽辐合强, 尤其强对流不稳定层结亦有利于低频或长周期能量波动的北传, 即强对流云团越显著的区域, 越易产生低频波北传的现象。以上推导的结论进一步证实了低频振荡经向传播特性及其伴随着热带对流云团或超级云团向北作经向传播的特征, 这研究结果亦为长期预报因子选择与基本思路建立了理论基础。

7 低频波能量经向传播折向、反射点条件

$$\frac{dy}{dx} = \frac{C_{gy}}{C_{gx}} = \frac{2(y)kl/(k^2 + l^2)^2}{\left(+ n \frac{q_s}{p} \right) / k + 2(y)k^2 / (k^2 + l^2)^2} \quad (32)$$

其中

$$k^2 + l^2 = \frac{k}{\bar{u}k - \left(+ n \frac{q_s}{p} \right)} \quad (33)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2kl}{\frac{k}{\bar{u}k - \left(+ n \frac{q_s}{p} \right)} + 2k^2}$$

$$l = \frac{k}{\bar{u}k - \left(+ n \frac{q_s}{p} \right)} - k^2 \quad (34)$$

$$\text{波射线转向点, 即极值点} \quad \frac{dy}{dx} \bigg|_{\max} = 0 \quad (35)$$

假设 $\bar{u}(y) = \bar{u}_0 + \frac{d\bar{u}}{dy} \Delta y$, 考虑波射线转向点为 $y_{\max}$, 则

$$\bar{u}(y) = \bar{u}_0 + \frac{d\bar{u}}{dy} y_{\max}$$

$$\frac{k}{\left(\bar{u}_0 + \frac{d\bar{u}}{dy} y_{\max} \right) k - \left(+ n \frac{q_s}{p} \right)} - k^2 = 0 \quad (36)$$

$$k \left(\bar{u}_0 + \frac{d\bar{u}}{dy} y_{\max} \right) - (k^2 \bar{u}_0 + \frac{d\bar{u}}{dy} k^2 y_{\max}) k + \left(+ n \frac{q_s}{p} \right) k = 0 \quad (37)$$

$$y_{\max} = \frac{-\left(k^2 \bar{u}_0 - \left(n + \frac{q_s}{p}\right)k\right)}{-\frac{d\bar{u}}{dy}k^2 + \frac{d}{dy}} \quad (38)$$

$$= \left(-k^2 \bar{u}_0 + \left(n + \frac{q_s}{p}\right)k\right) / \left(\frac{d\bar{u}}{dy}k^2 - \frac{d}{dy}\right)$$

由上式可知, 波动能量经向传播的最北距离 $y_{\max}$ (转向点) 与低纬纬度、参数、波数、基本气流、波动频率、基流切变以及积云对流层结不稳定有关, 即对于低纬地区, 波数小、基流弱或基流切变弱的条件, 且 $\frac{d}{dy}$ 低纬 $\frac{d}{dy}$ 中、高纬, 则波动易传播到偏北的位置; 尤其值得注意的是对于低频波只有在水汽低层辐合强, 并伴随强对流云团不稳定层结的条件, 波动能量才易向北经向传播, 以上研究结论进一步揭示了低纬低频波伴随着强积云对流云团向北传播的观测事实的机理特征。

8 低频波与波射线形态的相关特征

对于长波而言, $\frac{k}{l} < 1$, 即 $k^2 \ll l^2$, 在此前提下, 可将方程(32) 简化为

$$\frac{dy}{dx} = \frac{C_{gy}}{C_{gx}} = \frac{2kl}{\frac{1}{k}(k^2 + l^2)^2 + 2k^2} = \frac{2kl}{\frac{1}{k}l^4 + 2k^2} \quad (39)$$

假设 $y = y_0 + \frac{d}{dy}y$, 则

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2\left(y_0 + \frac{d}{dy}y\right)kl}{\frac{1}{k}l^4 + 2\left(y_0 + \frac{d}{dy}y\right)k^2} \quad (40)$$

即可改写为

$$\frac{C + Dy}{A + By} dy = dx \quad (41)$$

其中

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2kl y_0 \\ 2 \frac{d}{dy}kl \\ \frac{1}{k}l^4 + 2y_0 k^2 \\ 2k^2 \frac{d}{dy} \end{pmatrix}$$

积分方程(41) 两端

$$\int \frac{\left(\frac{1}{k}l^4 + 2y_0 k^2\right) + 2k^2 \frac{d}{dy}y}{2kl y_0 + 2 \frac{d}{dy}kly} dy = \int dx \quad (42)$$

则可得波射线解为

$$\begin{aligned} & \frac{B}{C} \ln(A + By) + \frac{DA}{B^2} [A + By - A \ln(A + By)] + C_0 \\ &= X C_0 + \frac{DA^2}{B^2} + \frac{DA}{B} y + \left(\frac{C}{B} - \frac{DA^2}{B^2} \right) \ln(A + By) = X \end{aligned} \quad (43)$$

则波射线方程形式为:

$$\tilde{a} + \tilde{b}y + \tilde{c} \ln(\tilde{d} + \tilde{e}y) = X$$

即

$$J_1(y) + J_2(y) = X \quad (44)$$

其中:

$$\begin{aligned} X &= x + C^* \\ \begin{pmatrix} \tilde{a} \\ \tilde{b} \\ \tilde{c} \\ \tilde{d} \\ \tilde{e} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} C_0 + \frac{DA^2}{B^2} \\ \frac{DA}{B} \\ \frac{C}{B} - \frac{DA^2}{B^2} \\ A \\ B \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (45)$$

$J_1(y)$ 为直线束解部分, $J_2(y)$ 为指数解部分。

若只考虑波射线直线束解部分 $J_1(y)$, 其波射线解简写为如下形式:

$$\tilde{a} + \tilde{b}y = X \quad (46)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} \tilde{a} = C_0 + D \frac{A^2}{B^2} = C_0 + \frac{2k^2_0}{\frac{d}{dy}} \\ \tilde{b} = \frac{DA}{B} = 2k^2_0 \end{cases} \quad (47)$$

由式(46)、(47)可知

直线波射线的斜率(射线角)取决于波数与 k_0 参数, 即低纬地区 k_0 值大, 波射线直线偏北方向显著; 若波数大, 波射线偏北亦显著。

对于波射线方程指数解 $J_2(y)$ 而言, 若假设 $k = l$

则

$$2k^2 \frac{d}{dy} = 2kl \frac{d}{dy} \quad (48)$$

即

$$D = B \quad (49)$$

可将波射线方程解简写指数部分形式(J_2)为

$$\ln(\tilde{d} + \tilde{e}y) = \frac{1}{\tilde{c}}(X - \tilde{a}) \quad (50)$$

即曲线形式如下:

$$y = \frac{1}{\tilde{e}} [e^{\frac{1}{\tilde{c}}(X - \tilde{a})} - \tilde{d}] \quad (51)$$

其中

$$\sigma = \frac{C}{B} - \frac{DA^2}{B^2} = \left(\frac{1}{k} l^4 + 2 \omega k^2 \right) / 2 \frac{d}{dy} kl - 2k^2 \frac{d}{dy} (2kl_0)^2 / \left(2 \frac{d}{dy} kl \right)^2 \quad (52)$$

上述非零频波波射线方程解的讨论进一步揭示了波频率数可能引起波射线路径的“形变”。

由式(51), (52) (e 指数形式解部分) 可知, 波射线向北传播的路径与波频率、参数及其变率、波数参数等因子相关, 波频率越低, 波数越小, 波射线经向传播的特征越显著, 尤其波频率明显影响波射线 e 指数曲线部分。

9 结 论

文中采用无辐散与有辐散条件两类准地转涡度方程讨论了大气低频振荡传播的动力特征, 并探讨了 WKB 近似条件及其波射线方程波频率特征解, 揭示出 2 维 Rossby 波频散机理中低频能量的经向传播的频率优势及其热带地区积云对流、低纬参数特定的有效影响条件问题, 可得出如下结论:

(1) 低纬地区低频波易满足 WKB 解的近似条件, 即低纬非均匀基流动力结构及其切变和因子及其经向变率易符合 2 维 Rossby 波有关 WKB 近似解的约束条件。

(2) WKB 近似解波振幅与频率相关, 对于低频波能量扰动振幅大, 高频波振幅小; 对于不稳定层结的条件, 在水汽垂直结构呈弱不稳定的“水汽柱”结构, 特征则波能量扰动振幅亦显著。

(3) 低纬地区伴随强不稳定层结对流云团系统亦有利于低频振荡能量经向传播。

(4) 波射线转向点距离与参数、波数、基流以及波动频率、层结不稳定相关, 尤其低纬因子以及强对流不稳定层结构云团系统有利于波动能量向北传播至较远的距离。

(5) 能量波射线解直线束斜率(射线角) 取决于波数与参数, 即波数小, 低纬值高, 直线束波射线能量经向传播显著; 波射线指数解经向传播特征与波频率相关更为明显, 波频率越低, 波数越小, 能量波射线向北传播特征越明显。

根据上述动力分析结论可以发现, 低纬地区低频振荡伴随着显著的不稳定层结强对流云团系统, 即两者共存条件下低频振荡可维持能量向北经向传播趋势, 且可以将扰动能量传输到偏北的波射线转向点。本文的动力学理论研究揭示了热带大气低频振荡经向传播的机理特征, 即描述了强迫源振荡波频率参数及其强迫源纬度因子, 积云对流环境特征对低纬大气能量经向传播特征的影响机理及其物理图象。

参 考 文 献

- 1 Webster p J, Holton J R., Cross-equatorial response to middle-latitude forcing in a zonally varying basic state. J Atmos sci, 1982, 39, 723- 733
- 2 Yasunair T. Structure of an Indian summer monsoon system with around 40- day period. J Meteor Sci Japan, 1981, 59, 336- 354
- 3 Murakami T, Nakazawa T, He J. On the 40- 50 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere Summer, part I: Phase propagation. J Meteor Soc Japan, 1984, 62, 440- 468
- 4 Xu Xiangde, et al. A dynamical analysis of basic factors of low-frequency Oscillation in the tropical atmosphere. A. M.

- S 1990, 4(2): 157– 166,
- 5 何金海. 亚洲季风区纬圈剖面内准 40 天周期振荡的环流结构及其演变. 热带气象, 1988, 4(2): 116–125.
- 6 Krishnamurti T N, et al. Divergent circulations on the 30– 50 day time scale. J Atmos Sci, 1985, 42, 364– 375
- 7 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1991. 207
- 8 Nitta T. Convection activities in the tropical Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. J Atmos Soc Japan, 1987, 64, 373– 390
- 9 谢定裕. 渐近方法—在流体力学中的应用. 北京: 友谊出版公司, 1983. 182~184
- 10 朱乾根, 林锦瑞等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1992. 914

THE LOW FREQUENCY DYNAMICS ON THE WAVE RAY PROPAGATION OF TROPICAL ATMOSPHERE ENERGY DISPERSION

Xu Xiangde Miao Qiuju

(chinese academy of meteorological sciences, beijing, 10081)

Abstract

In the presence of non-zero frequency wave (NFW), two kinds of mathematical models with or without divergence are investigated about the dynamics of low frequency propagation of tropical atmosphere in the study. The results suggest that the frequency parameter of NFW is a key factor, which dominates the wave train path of energy dispersion as well as the amplitude variation, and that the meridional propagation of low frequency oscillation (LFO) in tropics has the significant correlation with the strong convective cloud cluster accompanied and, to a certain extent, with effect in the lower latitudes. The conclusion presented here confirms further the phenomena and mechanisms about the meridional migration of atmospheric LFO in lower latitudes and the accompanying cumulus convection. The mathematical mode of wave ray equation responding to the atmospheric LFO dynamic characteristics. The vertical structure of water vapor and unstable stratification etc. are also shown in the paper,

Key words: Tropics, Non-zero frequency wave, Low frequency, Wave ray, WKB approximation