

南亚夏季风槽脊和热带气旋的活动 与移动性 CISK 波

李 崇 银

(中国科学院大气物理研究所, 北京)

摘 要

MONEX 资料的分析表明, 南亚夏季的季风槽脊有 30—50 天的周期振荡现象和缓慢的向北移动; 季风槽中的热带气旋又有向东频散能量的现象。

基于引入了基本气流垂直切变的 CISK 模式, 本文得到了一种缓慢移动的 CISK 波。在南亚夏季风状况下, 这种 CISK 波向北的经向速度约为每天 0.6 纬度, 振荡周期约为 34 天; 考虑到对流层低层平均西风对扰动能量的影响后, CISK 波将向西北移动, 而能量向东传播。这些理论结果同 MONEX 资料分析相当一致。因此, 垂直切变基本气流通过 CISK 机制产生的 CISK 波极可能是南亚夏季风槽脊和热带气旋活动的重要驱动机制。

一、引 言

南亚地区的夏季季风在世界范围内最为强大和典型。夏季风的活动对南亚地区 (包括中国南部) 的天气气候有重要的影响, 因此, 南亚夏季风的研究一直为气象工作者所重视。

夏季风活动中, 季风潮 (即季风加强) 和季风中断是人们早就熟知的事实, 而季风潮和季风中断实际上是季风槽和季风脊的活动。因此, 了解季风槽脊的活动规律, 及其动力学机理, 对研究南亚地区的天气气候是很有意义的。

季风槽中, 在印度大陆上经常有季风低压活动, 在孟加拉湾等地常有热带气旋活动, 一些严重天气 (主要表现为暴雨) 往往都是由于它们的活动所造成的。因此, 南亚地区热带气旋和季风低压的活动规律也是极为重要的研究课题。

MONEX 为南亚季风的研究提供了较好的观测资料, 根据 1979 年夏季 MONEX 资料的分析, Krishnamurti 等^[1]发现南亚季风槽脊在缓慢向北移动中有 30—50 天的周期振荡, 从而认为南亚夏季季风活动中有 30—50 天波存在。Murakami 等^[2]的研究也证实了周期为 40—50 天的波动在夏季风区域的存在。同时, 他们还发现南亚地区活动的热带气旋和季风低压有向东频散能量的现象, 表明有一种具有群速度向东传播的波存在。那么, 上述两种现象是否为某

同一种波动所造成呢? 这种波又是如何产生的呢? 这些都是没有研究,而又需要回答的问题。

关于热带气旋的形成和维持,第二类条件不稳定(CISK)被认为是主要机制。而关于季风低压的一些研究表明,季风低压的形成主要是正压不稳定机制,而季风低压的发展和维持则主要依靠 CISK^[3-4]。因此,讨论南亚地区夏季热带气旋和季风低压的活动,需要考虑 CISK 机制。同时,南亚地区夏季风场存在着极其突出的垂直切变,研究季风系统的活动还必须考虑到它们的动力作用。

二、资料的分析结果

根据风场资料的分析, Krishnamurti 等发现,在夏季 MONEX 期间,存在着一种周期为 30—50 天缓慢向北传播的波,经向速度约为每天 0.75 纬度。这种波的振幅一般为 2—4 米/秒,

经向波长可达 3000km。图 1 是根据参考文献[1]所给出的资料绘制的南亚夏季风槽(虚线)脊(实线)位置变化图。可以看到,从 5 月 2 日到 5 月 22 日,季风槽线大致由 5°N 逐渐北移到了 27°N 附近;而由 5 月 20 日到 6 月 9 日,季风脊线又大致由 3°N 逐渐北移到 23°N 附近。因此,在 MONEX 期间,南亚夏季季风槽(脊)非常明显地缓慢向北移动,季风槽和脊的转换时间(振荡半周期)约为 20 天。

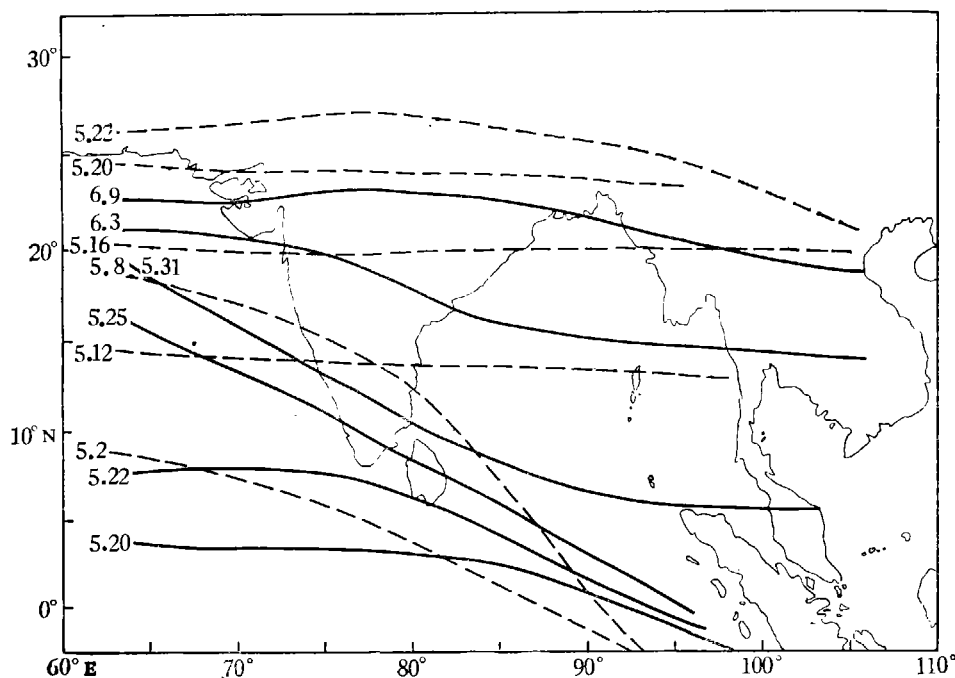


图 1 1979 年 5 月 2 日—6 月 9 日南亚夏季风槽脊位置变化图

图 2 是用 45 天滤波器处理后的 850mb 上纬向风($\bar{u}'$)和经向风($\bar{v}'$)的时间-纬度剖面,风场的周期性扰动,以及扰动由赤道附近向北的缓慢移动都极为清楚。

我们知道,在季风槽内往往有热带气旋和季风低压的存在,实际上它们也是季风槽的重要组成部分。热带气旋和季风低压除了在季风槽中向偏西方向移动外,也随季风槽一道向北移

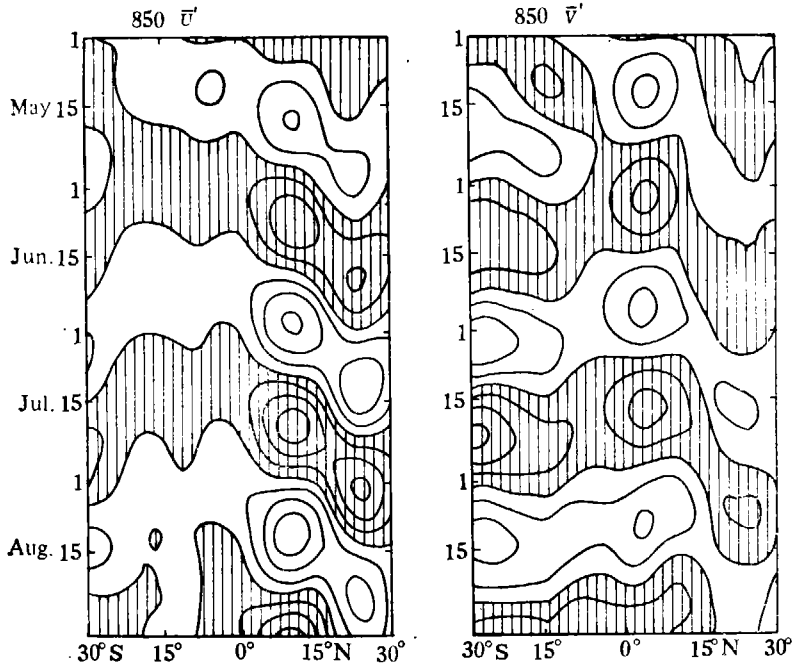


图 2 850mb 上 45 天过滤风($\bar{u}'$ 和 $\bar{v}'$)的时间-纬度剖面^[1]

动。同时，Murakami 等的研究发现，南亚地区在一个热带气旋发展的东偏南方向往往会有另一个热带气旋形成^[2]。或者说，热带气旋在那里可以向东偏南方向频散能量，其群速度同热带气旋和季风低压移动的相速度方向相反。图 3 是 1979 年夏季南亚地区 15°N 纬度上 850mb 纬向风扰动(U')和位势扰动(Φ')的时间-经度剖面。由图 3 不仅可以看到，风场和位势场的

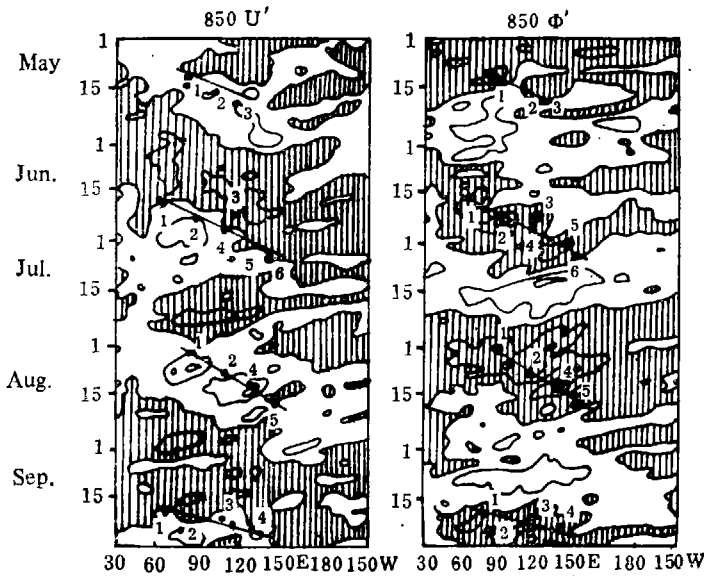


图 3 1979 年夏季南亚地区 15°N 纬度上 850 mb U' 和 Φ' 的时间-经度剖面^[2]

40—50 天振荡, 而且热带气旋(图中用数字标出)的活动也有类似的周期。同时, 热带气旋的依次出现反映出有向东的群速度, 这种能量频散的群速度约为每天 4—8 个经度, 图 3 中表明在 5 月份有三个扰动, 扰动 1 是一个热带气旋, 它于 5 月 7 日在赤道孟加拉湾生成, 于 5 月 11 日移动到印度东部海岸 (80°E , 15°N); 第二个气旋(标号 2)则于 5 月 16 日在马来半岛附近形成; 第三个气旋于 5 月 20 日在菲律宾附近形成。热带气旋在形式上向东传播的现象很清楚, 即是说气旋的能量有向东频散(有向东群速度)的现象。图 3 还表明, 1979 年夏季, 在 6 月 16 日—7 月 6 日, 8 月 1—21 日, 9 月 17 日—28 日期间也有类似的热带气旋能量向东频散的现象。

三、垂直风切变所激发的移动性 CISK 波

前面我们已经指出, 热带气旋的发生发展以及季风低压的发展和维持, 都依赖于 CISK 机制。而在南亚夏季季风期, 对流层上层一般有强的偏东气流, 低层为较强的西南风。因此, 垂直切变基本气流必然对 CISK 机制产生影响, 也将对热带气旋和季风低压的活动产生影响。

热带气旋和季风低压都可视为轴对称的系统, 经典的 CISK 理论都是用轴对称坐标系来讨论, 为了便于引入基本气流, 我们将用平面对称坐标系代替柱对称坐标系。由于风有 x 方向分量(u)和 y 方向分量(v), 在讨论基本气流($\bar{u}$ 和 $\bar{v}$)的影响时, 可分别用对 x 轴呈对称和对 y 轴呈对称的两种坐标系。对于前一种情况, 根据文献[5]的讨论, 扰动方程可写成:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \omega \frac{d\bar{u}}{dp} = fv, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = -fu, \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \frac{pS}{R} \omega = \frac{Q}{c_p}. \quad (5)$$

这里 u , v 和 ω 分别为 x , y 和 p 方向的速度分量; ϕ 和 T 分别为位势和温度; f 是科氏参数, 假定为常数; R 是气体常数; c_p 是空气定压比热, $S = -\frac{R}{p} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial p} - \frac{R\bar{T}}{p^2} \right)$, 为静力稳定度参数; Q 是单位质量空气的对流凝结加热率。 $\bar{u}$ 和 $\bar{T}$ 代表基本量, 它们满足关系式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} &= -f\bar{u}, \\ \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial p} &= -\frac{R\bar{T}}{p} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在两层模式情况下, 仿照 Charney 等的参数化办法^[6]引入对流凝结加热, 即取

$$Q_2 = -\frac{\mu L}{2\Delta} (\bar{q}_3 - \bar{q}_1) \left(\omega_2 + \frac{1}{2} \omega_4 \right), \quad (7)$$

其中 L 是凝结潜热; $\bar{q}_i$ 是空气饱和比湿; $\Delta = 450\text{mb}$, 是垂直分层的气压间隔; μ 是加热参

数,其值可调节对流加热强度。

假定基本气流随高度线性变化,即取 $\frac{d\bar{u}}{dp}$ 为常数,由(1)–(7)式我们不难得到方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial y^2} + 2 \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{f}{S_2 \Delta} \frac{\partial}{\partial y} (\omega_3 - \omega_1) + \frac{f^2}{\Delta^2 S_2} (\omega_4 - 2\omega_2) \\ = H\mu \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\omega_2 + \frac{1}{2} \omega_4 \right), \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$H = \frac{RL}{2c_p S_2 p_2 \Delta} (\bar{q}_{s3} - \bar{q}_{s1})$$

是一个大气状态参数,对于热带大气,一般可近似取 $H = 1.1$ 。

根据 Krishnamurti 等的研究^[7],季风低压系统中,垂直(上升)速度的铅直分布同热带低压是类似的,一般在 300–400mb 有极大值。由此我们可取近似关系 $\omega_3 - \omega_1 = \frac{1}{2} (\omega_4 - \omega_2)$ 。

再依(4)式引入流函数 ψ ,并令 $\psi = \Psi e^{\sigma t}$,由方程(8)可得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y^2} + \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{f}{S_2 \Delta} \frac{\partial}{\partial y} (\Psi_4 - \Psi_2) + \frac{f^2}{\Delta^2 S_2} (\Psi_4 - 2\Psi_2) \\ = \mu H \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\Psi_2 + \frac{1}{2} \Psi_4 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

由于边界层摩擦作用,Ekman 抽吸造成的垂直运动可按 Charney 等的办法引入,并可以得到关系式

$$\Psi_4 = \frac{K}{K + \sigma} \Psi_2, \quad (10)$$

其中 K 是边界层摩擦系数,对于热带大气边界层,一般 $K = 1.72 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 。

将(10)式代入方程(9),再令 $\Psi_2 = A e^{i l y}$,并考虑到 $\sigma = \sigma_r + i \sigma_i$,我们不难得到两个方程

$$[2(\sigma_r + K) - \mu H(2\sigma_r + 3K)]l^2 - 2l\varepsilon\sigma_i + \eta(2\sigma_r + K) = 0, \quad (11)$$

$$2(1 - \mu H)\sigma_i l^2 + 2l\varepsilon\sigma_r + 2\eta\sigma_i = 0. \quad (12)$$

这样,我们可以得到 CISK 波的增长率(σ_r)和频率(σ_i)分别为:

$$\sigma_r = \frac{[(3\mu H - 2)l^2 - \eta]K}{2[(1 - \mu H)l^2 + \eta] + \frac{l^2 \varepsilon^2}{(1 - \mu H)l^2 + \eta}}, \quad (13)$$

$$\sigma_{iy} = - \frac{l\varepsilon\sigma_r}{(1 - \mu H)l^2 + \eta}. \quad (14)$$

上面各式中 $\eta = \frac{2f^2}{\Delta^2 S_2}$; $\varepsilon = \frac{f}{S_2 \Delta} \frac{d\bar{u}}{dp}$, ε 反映了垂直切变基本气流的影响; l 为 y 方向的波数。

由(13)和(14)式我们可以看到,当 $\varepsilon = 0$ 时,有 $\sigma_i = 0$,将只有常定型 CISK。即在没有垂直切变基本气流的情况下,对流凝结加热的反馈作用,将产生一种不传播的 CISK。然而,若

$\varepsilon \approx 0$, 一般应有 $\sigma_l \approx 0$. 这时将出现一种移动型的 CISK 波. 也就是说, 当有垂直切变基本气流存在的情况下, 通过积云对流的反馈作用, 可以产生一种移动性 CISK 波.

考虑 $\frac{d\bar{v}}{dp}$ 的影响, 用 x 换 y , k 换 l , u 和 v 对换, 则通过(1)–(6)式, 由相同的推导, 可以得到 σ_r 和 σ_{lx} 如下:

$$\sigma_r = \frac{[(3\mu H - 2)k^2 - \eta]K}{2[(1 - \mu H)k^2 + \eta] + \frac{k^2 \varepsilon^2}{(1 - \mu H)k^2 + \eta}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{lx} = \frac{\varepsilon k \sigma_r}{(1 - \mu H)k^2 + \eta}. \quad (16)$$

这里 k 是 x 方向的波数, $\varepsilon = \frac{f}{S_2 \Delta} \frac{d\bar{v}}{dp}$. 如果 x 方向和 y 方向波数相同, 而且 $\frac{d\bar{u}}{dp} = \frac{d\bar{v}}{dp}$, 那么(13)式和(15)式完全一样. 这是应有的结果, 从一个侧面说明本节的处理方法是合理的.

四、模式大气结果及讨论

热带气旋和季风低压的发展和维持依赖于第二类条件不稳定, 移动性 CISK 波也就必然对热带气旋和季风低压的活动产生影响. 这里首先讨论 CISK 波的活动性质. 按大气波动理论, 由(14)式我们不难得到 CISK 波的相速度 C_y 和群速度 C_{gy} 的表达式:

$$C_y = -\frac{\sigma_{ly}}{l} = \frac{\varepsilon \sigma_r}{(1 - \mu H)l^2 + \eta}, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} C_{gy} &= -\frac{d}{dl} \sigma_{ly} \\ &= C_g \left[1 - \frac{2l^2(1 - \mu H)}{(1 - \mu H)l^2 + \eta} \right] + \frac{l\varepsilon}{(1 - \mu H)l^2 + \eta} \frac{d\sigma_r}{dl}. \end{aligned} \quad (18)$$

根据 CISK 理论, 当扰动得以发展而成为较强的热带气旋时, 对于热带气旋尺度的系统 (k_c, l_c) , 其增长率应为最大值, 即近似可以有 $(d\sigma_r/dl)_{l_c} \approx 0$, 因此可得到

$$C_y \approx \frac{f\sigma_r}{S_2 \Delta [(1 - \mu H)l^2 + \eta]} \frac{d\bar{u}}{dp}, \quad (19)$$

$$C_{gy} \approx C_y \left[1 - \frac{2l^2(1 - \mu H)}{(1 - \mu H)l^2 + \eta} \right]. \quad (20)$$

类似地, 由(16)式则可得到

$$C_x \approx -\frac{f\sigma_r}{S_2 \Delta [(1 - \mu H)k^2 + \eta]} \frac{d\bar{v}}{dp}, \quad (21)$$

$$C_{gx} \approx C_x \left[1 - \frac{2k^2(1 - \mu H)}{(1 - \mu H)k^2 + \eta} \right]. \quad (22)$$

分析 CISK 波的相速度和群速度的表达式(19)–(22), 可以清楚看到:

1) 一般情况下,

$$1 < \frac{2l^2(1 - \mu H)}{(1 - \mu H)l^2 + \eta} \left(\text{或} \frac{2k^2(1 - \mu H)}{(1 - \mu H)k^2 + \eta} \right) < 2.$$

因此, CISK 波的群速度(C_g)要比相速度(C)为小, 而两者的传播方向正好相反. 即是说, 如

果 CISK 波向西传播,其能量却较缓慢地向东频散。

2) 在夏季的南亚季风期,一般都有 $\frac{d\bar{u}}{dp} \geq \frac{d\bar{v}}{dp} > 0$, 故在这里 CISK 波一般向西北方向传播。因为一般有 $1 - 2k^2(1 - \mu H)/[(1 - \mu H)k^2 + \eta] < 0$, 故其能量却向东南方向传播。这些理论结果同 Murakami 的分析结果基本一致。

对于南亚夏季季风期的大气基本状态,我们取 $f = 0.377 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ (即 15°N 之值), $S_2 = 0.032 \text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{mb}^{-2}$, $\mu = 0.865$ 。热带气旋对流云系的直径一般约为 900km 左右,因此可取 $l = k = \frac{2\pi}{L} = 3.4907 \times 10^{-6} \text{m}^{-1}$ 。根据南亚夏季季风期平均风速分布,一般 $\frac{d\bar{u}}{dp} \approx 3.54 \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \text{mb}^{-1}$,

$\frac{d\bar{v}}{dp} \approx 1.23 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \text{mb}^{-1}$ 。用上述参数,由(19)–(22)式可得如下计算结果:

$$C_y = 2.7(\text{km/h}), C_x = -0.94(\text{km/h});$$

$$C_{gy} = -0.40(\text{km/h}), C_{gx} = 0.14(\text{km/h}).$$

同时,由上述南亚夏季季风期的大气参数,还可以求得 CISK 波的经向传播周期 T 为 34 天。

前面已经指出,根据 MONEX 期间 850mb 上的资料分析, Krishnamurti 等发现,在南亚地区的夏季季风期,季风槽脊线有 30–50 天的振荡周期,而且季风槽脊线向北的经向传播速度约为每天 0.75 纬度。根据本文的分析,在垂直切变基本气流作用下,对流凝结加热通过 CISK 机制,可以产生一种移动性的 CISK 波,这种波动在南亚夏季大气状态下,其经向(向北)传播速度约为每天 0.6 纬度,振荡周期为 34 天。同资料分析结果的相近,我们可以初步认为,南亚地区夏季季风期的 30–50 天的振荡现象,是由于垂直切变基本气流所产生的缓慢北移的 CISK 波所驱动的。

依据 Murakami 等的分析,热带气旋扰动向东偏南的能量频散现象,其群速度约为每天 3–8 个经距。上面的简单计算结果同这些天气事实在总趋势上是一致的,扰动向西偏北方向移动,而能量向东偏南方向频散。但也存在着一些差异,其原因一方面可能是模式及所取参数均比较简单,不能完全反映南亚大气夏季的实际运动状态;另一方面可能是我们的理论分析仅考虑了基本气流垂直切变的作用,模式结果未包括基本气流本身对扰动移动的影响。根据热带气旋移动的“引导”原理,热带气旋的移速和移向均要受引导气流的控制,并通常可用 500mb 的平均风作为引导气流。在南亚夏季季风期,500mb 上一般为弱东风。这样,热带气旋和季风低压的移速和移向,就可同实际情况比较接近了。

关于群速度,本文计算结果比较小,也同 Murakami 等的分析结果有差异。但是下述讨论可能是有道理的:热带气旋的发展和维持主要靠 CISK 机制,系统的能量主要来自对流凝结潜热的释放,而释放潜热的水汽供应主要通过边界层的摩擦辐合。因此,扰动能量的输送不能不受到对流层低层气流的影响。同时,在另一个研究中我们已证明,对流层低层的气旋性切变基本气流将会使 CISK 加强,有利于热带气旋的发展^[6]。在南亚夏季季风区,对流层低层气旋性切变基本气流主要由季风的一次次加强造成。这样,有了 CISK 波的群速度,又考虑到对流层低层平均西风对能量输送的影响,可以得到南亚夏季热带气旋和季风低压的能量频散速度基本上同 Murakami 等的分析结果相近。

在实际天气图上,同季风槽相连接,在中印半岛和以东地区是热带辐合带 (ITCZ)。在南

亚夏季风期, 由于低层为较强西南季风, 高层是南亚高压所形成的强东风, 因此基本气流的垂直切变既强且稳定. 相对于全球其他地区, CISK 波在这里最强, 季风槽脊的周期振荡现象, 以及热带气旋的能量频散现象, 都在这里最明显. 而这些特征也已为资料分析所证实. 按本文结果推断, 西太平洋及我国南海地区的 ITCZ 的活动也会有长周期振荡现象, 但由于基本气流垂直切变相对较小, 因此 CISK 波在那里相对要弱一些, 振荡周期可能也会有所差别. 当然, 这些推断尚有待观测资料的分析证明.

Murakami 等的分析和本文的结果都表明, 季风槽内的热带气旋和季风低压可以向东偏南方向频散能量, 有利于新的扰动的形成. 但需要指出, 这种能量频散只可能是触发新扰动的一种机制, 热带扰动的形成还会有别的机制, 并要受到其他条件的制约.

五、结 语

本文将南亚夏季季风期所存在的极其明显的基本气流的垂直切变引入 CISK 模式, 从而得到了一种缓慢移动的 CISK 波. 这种波的经向速度约为每天 0.6 纬度, 振荡周期为 34 天, 同 Krishnamurti 等根据 MONEX 资料所发现的 30—50 天波相当一致. 从 Krishnamurti 的另一研究可以看到, 30—50 天波在南亚夏季最明显^[9], 这也同我们前面的理论分析相符. 因为南亚地处热带, 第二类条件不稳定经常可以发生, 而该地区夏季流场有最显著的平均风的垂直切变, 使得移动性 CISK 波在南亚夏季风区最活跃. 因此可以初步认为, 南亚夏季季风期, 季风槽脊的 30—50 天周期振荡现象和季风槽脊的移动, 极可能是由本文所指出的 CISK 波驱动的.

本文所得到的 CISK 波的群速度同其相速度方向相反, 对于南亚夏季季风期, 考虑到对流层低层平均西风对能量传播的影响, 可以得到同 Murakami 等的天气分析结果相近的能量频散速度. 说明南亚地区热带气旋所表现出的向东能量频散, 可能同垂直切变基本气流所激发的 CISK 波的活动有关.

本文第一次对南亚夏季季风的 30—50 天振荡现象以及热带气旋能量的向东频散提出了初步的动力学解释. 由于数学模式简单, 难于得到同实际完全相符的理论结果, 更细致的理论分析和有关数值模拟研究有待进一步开展.

参 考 文 献

- [1] Krisnamurti, T. N. and Subrahmanyam, D., The 30—50 day mode at 850 mb during MONEX, *J. Atmos. Sci.*, **39**(1982), 2088—2095.
- [2] Murakami, T., Nakazawa, T. and J. He, On the 40—50 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere Summer. Part I: phase propagation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **62** (1984), 440—468.
- [3] Shukla, J., CISK-barotropic-baroclinic instability and the growth of monsoon depression, *J. Atmos. Sci.*, **35**(1978), 495—508.
- [4] Mak, M. and Jim Kao, C. Y., An instability study of the onset-vortex of the southwest monsoon, 1979, *Tellus*, **34**(1982), 358—368.
- [5] 李崇银, 垂直切变基本气流中的 CISK, *大气科学*, **7**(1983), 427—431.
- [6] Charney, J. G. and Eliassen, A., On the growth of the hurricane depression, *J. Atmos. Sci.*, **21**(1964), 68—75.
- [7] Krishnamurti, T. N. et al., Study of a monsoon depression (I), Synoptic structure, *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**(1975), 227—240.
- [8] 李崇银, 环境流场对台风发生发展的影响, *气象学报*, **41**(1983), 275—284.
- [9] Krishnamurti, T. N. and Sulochana Gadgil, On the structure of the 30 to 50 day mode over the globe during FGGE. (in press).