

短 论

垂 直 风 切 变 中 的 CISK

李 崇 银

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

天气分析已得到，“对流层通风”是热带气旋形成和发展的基本条件之一。本文基于第二类条件不稳定(CISK)概念，从动力学角度研究了这个问题。两层模式的分析和计算都表明，垂直切变基本气流的存在对热带扰动的发展有阻尼作用，同天气分析结果相一致。

一、前 言

第二类条件不稳定(英文缩写为 CISK)是由 Charney 等^[1,2]提出的一个重要热带大气动力学概念，它从理论上较好地说明了台风的发生发展，故一直被视为台风形成的重要动力学机制。CISK 理论指出，天气尺度的低压涡旋和积云对流，通过近地面摩擦作用可以产生相互促进的正反馈过程。最初，Charney 等在研究 CISK 机制时没有考虑基本气流的影响，后来在另一研究中，Charney 考虑了在边界层中有一常值基本气流的情况，即讨论了可移动边界层问题^[3]。结果表明，基本气流的增大将增加最大增长率的宽度，但却使增长率的数值减小。在实际大气中，基本气流并非常值，有明显的空间结构，尤其是垂直切变。因此，研究垂直切变基本气流对 CISK 的影响有一定的理论意义。

另一方面，关于台风发生发展的一系列天气和气候学研究都一致指出，纬向风垂直切变的极小值区同扰动和风暴发展区有极好的相关，而大的垂直切变风场会使扰动和风暴的发展受阻^[4~6]。从而人们一直把“弱的对流层风垂直切变”作为扰动和风暴发展的一个必要条件，即所谓“对流层通风”条件。如何从动力学角度进一步阐明垂直风切变对热带扰动发展的阻碍影响，无疑是一个有实际意义的问题。

本文将用简单的两层动力学模式，研究垂直切变基本气流对 CISK 机制的影响，讨论上面提到的理论和实际问题。

二、动 力 学 模 型

讨论 CISK 机制可以直接采用文献[1]的基本方程组，但为了简单，并利于引入基本

1982年1月30日收到，1983年3月5日收到修改稿。

气流，我们取平面对称坐标。在基本气流仅随高度线性变化 ($\frac{d\bar{u}}{dp} = \text{常数}$) 的假定下，线性化扰动方程可以写成：

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

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

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

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial \omega}{\partial p} \quad (4)$$

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

上述方程中 u , v 和 ω 分别是 x , y 和 p 方向的速度分量, ϕ 是重力位势, T 是温度, S 是 p 坐标下的静力稳定性参数, Q 表示单位质量的对流凝结加热。其中带有一横的量表示基本场量，它们满足如下关系：

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

由(6)式并考虑到 $\frac{d\bar{u}}{dp} = \text{常数}$ 的假定，可以得到如下关系式：

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} - \frac{pf}{R} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y \partial p} = 0 \quad (7)$$

这样，(1)–(5)式可以变为如下两个方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial y} + \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \omega}{\partial y} + f \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial p} - \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \omega}{\partial p} - \frac{S}{f} \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{R}{fp} \frac{\partial}{\partial y} \frac{Q}{C_p} \quad (9)$$

取

$$\begin{aligned} u(y, p, t) &= u(y, p)e^{\sigma t} \\ \omega(y, p, t) &= \omega(y, p)e^{\sigma t} \end{aligned} \quad (10)$$

我们最后得到

$$\sigma \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \omega}{\partial y} + f \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (11)$$

$$\sigma \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \omega}{\partial p} - \frac{S}{p} \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{R}{fp} \frac{\partial}{\partial y} \frac{Q}{C_p} \quad (12)$$

这就是我们所用的动力学模型，它包含着对流凝结加热作用，还有基本气流垂直切变的影响。

三、两层模式结果

考虑最简单的两层模式情况，假定其上下边界条件为：模式顶的垂直速度 $\omega_0 = 0$ ，而模式底即为 Ekman 层顶。由于 Ekman 抽吸作用^[1]，因此有

$$w_4 = \frac{1}{2} D_E \zeta_4 \sin 2\alpha \quad (13)$$

这里 w 是 z 坐标下的垂直速度， $D_E = \left(\frac{2y}{f}\right)^{\frac{1}{2}}$ 为 Ekman 层厚度， ζ_4 为模式底层的地转风涡度， α 是地面风与等压线的交角。

由(11)和(12)式我们可得两层模式的方程组：

$$\sigma \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \omega_1}{\partial y} + f \frac{\omega_2}{\Delta p} = 0 \quad (14)$$

$$\sigma \frac{\partial u_3}{\partial y} + \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \omega_3}{\partial y} + f \frac{\omega_4 - \omega_2}{\Delta p} = 0 \quad (15)$$

$$\sigma \frac{u_3 - u_1}{\Delta p} - \frac{\omega_3 - \omega_1}{\Delta p} \frac{d\bar{u}}{dp} - \frac{S_2}{f} \frac{\partial \omega_2}{\partial y} = \frac{R}{fp_2} \frac{\partial}{\partial y} \frac{Q_2}{C_p} \quad (16)$$

关于对流凝结加热，目前已有各种不同的参数化方案，为了便于同经典 CISK 机制相比较，我们仍直接用文献[1]中的参数化表示式，即令

$$Q_2 = -\frac{\mu L}{2\Delta p} (\bar{q}_n - \bar{q}_s) \left(\omega_2 + \frac{1}{2} \omega_4 \right) \quad (17)$$

其中 L 是平均凝结潜热， \bar{q} 是平均饱和比湿， μ 是描写大气加热的参数。(17)式是在对流凝结加热量同湿空气的辐合量成正比的假定下得到的，虽然简单，但却能反映热带大气运动的基本特征。

对于台风等一类热带涡旋系统，实际资料的分析表明，其垂直速度一般在 300—400 毫巴高度有极大值，在该高度以下，垂直速度平均而论随高度增加。故假定垂直速度随高度线性增加，虽比较简单些，但并不失一般特征。这样，我们可以取近似 $\omega_2 \approx \omega_1 - \omega_3$ ，亦即 $\frac{\partial}{\partial y} (\omega_3 - \omega_1) \approx -\frac{\partial}{\partial y} \omega_2$ 。引人流函数后，由(14)—(16)式则可以得到控制流函数的方程如下：

$$\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial y^2} - \frac{2f}{S_2 \Delta p} \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \phi_2}{\partial y} + \frac{f^2}{S_2 \Delta p^2} (\phi_4 - 2\phi_2) = \mu H \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\phi_2 + \frac{1}{2} \phi_4 \right) \quad (18)$$

这里 $H = \frac{RL}{2\Delta p S_2 p_2 c_p}$ ($\bar{q}_n - \bar{q}_s$)，为大气状态参数。

由下边界条件(13)我们不难求得第 4 层上流函数的近似表达式，即

$$\phi_4 = \frac{K}{K + \sigma} \phi_2 \quad (19)$$

其中 $K = 1.72 \times 10^{-6}$ 秒⁻¹，为近地面摩擦系数^[1]。这样，(18)式亦可写成

$$\left(1 - \mu H \frac{2\sigma + 3K}{2\sigma + 2K}\right) \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial y^2} - \frac{2f}{S_2 \Delta p} \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{\partial \phi_2}{\partial y} - \frac{2f^2}{S_2 \Delta p^2} \left(\frac{2\sigma + K}{2\sigma + 2K} \right) \phi_2 = 0 \quad (20)$$

再取 $\phi_2 = \Psi_1 e^{i\theta_2}$, 则有

$$\left(1 - \mu H \frac{2\sigma + 3K}{2\sigma + 2K}\right) l^2 + i\epsilon_* + \eta \frac{2\sigma + K}{2\sigma + 2K} = 0 \quad (21)$$

这里

$$\epsilon_* = \frac{2f}{S_2 \Delta p} \frac{d\bar{u}}{dp}$$

$$\eta = \frac{2f^2}{S_2 \Delta p^2}$$

由于 σ 是由实部 σ_r 和虚部 σ_i 组成的, 即 $\sigma = \sigma_r + i\sigma_i$, (21) 式则可以变成分别关于 σ_r 和 σ_i 的方程。求解这两个方程, 即可得到增长率 σ_r 和频率 σ_i 的表达式:

$$\sigma_r = K \frac{(3\mu H - 2)l^2 - \eta - \frac{2l^2\epsilon_*^2}{(1 - \mu H)^2 + \eta}}{2[(1 - \mu H)l^2 + \eta] + \frac{2l^2\epsilon_*^2}{(1 - \mu H)^2 + \eta}} \quad (22)$$

$$\sigma_i = -\frac{i\epsilon_*(\sigma_r + K)}{(1 - \mu H)^2 + \eta} \quad (23)$$

上两式表明了垂直风切变对 CISK 的影响。由(22)式可以清楚看到, 垂直风切变的存在将减小不稳定增长率, 而且其影响同扰动水平尺度有关。同时, 在无垂直风切变时 ($\epsilon_* = 0$), $\sigma_i = 0$, 这时不稳定扰动是一种常定波; 当有基本气流的垂直切变时, $\sigma_i \neq 0$, 则不稳定扰动是一种移动性波, 但计算表明其移动速度极慢。

图 1 给出了(22)式的计算结果。计算中我们取 $f = 0.377 \times 10^{-4}$ 秒⁻¹, $S_2 = 0.032$ 米²毫巴⁻²秒⁻², $\Delta p = 450$ 毫巴, $\mu = 0.86$, 而 $H = 1.1$, 类似于文献[1]所用之值。图中实线为没有切变基本气流的情况, 它类似于过去有关 CISK 的研究结果。图中点线和虚线分别是基本气流垂直切变 $d\bar{u}/dp$ 为 2.5 和 5.0 米秒⁻¹/100 毫巴的情况, 很显然, 垂直风切变减小了扰动发展的增长率。也就是说, 垂直风切变对 CISK 机制有抑制作用, 从而不利于热带风暴一类系统的发展。同时, 垂直切变越大, 对发展的抑制作用越厉害。Gray^[4] 的分析研究表明, 在 200—850 毫巴层中, 风速切变如果为 20—40 海里/小时 (即 1.6—3.2 米秒⁻¹/100 毫巴), 一般为风暴发展的受阻区。我们基于 CISK 机制, 用较简单的数学模型所得的结果, 虽不能定量, 但定性地从动力学角度也说明了基本气流垂直切变对台风发

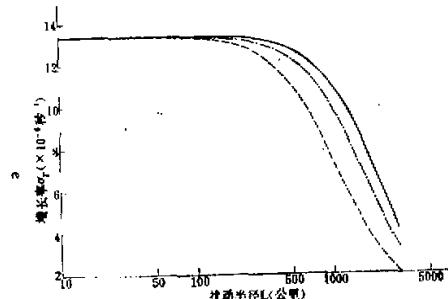


图 1 不稳定扰动的增长率

生发展的影响，而且同天气分析的结果基本一致。

四、结语

由上述分析和计算，我们可以得到这样几点结论：

1. 将上面的计算结果同已有的关于静力稳定度的研究结果相比较，可以发现，垂直切变基本气流的存在，类似于增大大气稳定度，从而可以抑制 CISK，不利于热带低压的发展。
2. 垂直切变基本气流对增长率 σ_r 的影响在公式中以平方形式出现，因此，不论是正切变还是负切变风场，其效果完全一样。这与天气分析所得结论相一致。
3. 垂直风切变的存在将改变不稳定波的性质，扰动由常定不稳定波变为缓慢移动的不稳定波。

参 考 文 献

- [1] Charney, J. G., and A. Eliassen, On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.*, 21, 68—75, 1964.
- [2] Ooyama, K., A dynamical model for the study of tropical cyclone development, *Geofis. Intern. (Mexico)*, 4, 187—198, 1964.
- [3] Charney, J. G., Movable CISK. *Dynamics of the Tropical Atmosphere*, 551, 1972.
- [4] Gray, W. M., Global view of the origin of tropical disturbances and storms, *Mon. Wt. Rev.*, 96, 619—700, 1968.
- [5] Ramage, C. S., Hurricane development, *J. Meteor.*, 16, 227—237, 1959.
- [6] Palmer, E. H., A Review of knowledge on the formation and development of tropical cyclones. *Proc. Trop. Cyclone Symp.*, Brisbane, 213—231, 1956.

CISK WITH THE VERTICAL SHEAR OF WIND

Li Chongyin

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

“The tropospheric ventilation” is one of fundamental conditions for the formation and development of tropical cyclones. The influence of the vertical shear of basic flow on the CISK is investigated from the viewpoint of dynamics. Theoretical study shows that the vertical shear of wind will hinder the development of tropical disturbance. This is agreeable with the result in synoptic analysis.

收
稿
手
稿