

动力气象讲座

第十三讲 热带大气动力学基础

李 崇 银

在第一讲里已指出，热带大气动力学的研究是一项极为重要的课题。这不仅因为热带大气的运动与中高纬度地区的大气运动相比有着许多不同的特点，而且在所谓的大气“热机”中，驱动大气热机的太阳辐射能大部分为热带地区的地球大气所吸收，以后通过大气运动才由热带将能量输送给中高纬度地区，因而热带是大气热量、动量和水汽的源。因此，热带大气动力学的研究对揭露全球大气运动的规律也有重要的意义。热带大气动力学的内容极其广泛，这里只能就其基本部分作简单介绍。

一、热带大气运动的尺度

中纬度地区大尺度运动主要表现为长波（波长 $L \sim 10^6$ 米）的活动，斜压不稳定是扰动发展的重要机制。但同中纬度地区常有的长波活动不一样，在热带大气中，水平尺度为 2000—5000 公里的扰动虽然也有，却并不常见。而经常可见水平尺度更大的超长波系统以及几百到一千公里左右的涡旋系统。

热带地区的大气超长波，既有所谓准静止行星波，在北半球夏季以南亚高压、中太平洋和中大西洋低压槽为代表，还包括移动性的超长波，如在大气波动一讲中提到的 Kelvin 波和混合罗斯贝—重力波等。Kelvin 波是一种与赤道平行的自西向东传播的波动，其波长约 20000—40000 公里，相速度

为 25 米/秒左右。混合罗斯贝—重力波是自东向西传播的波动，波长约 10000 公里，相速约 23 米/秒。

自气象卫星问世以来，人们对热带大气中的涡旋运动有了更深的认识。比如台风、云团等，都是热带大气涡旋运动的代表，它们的尺度一般是几百公里到一千公里，其动能主要来自对流凝结加热。

热带大气运动主要表现为涡旋运动和超长波，具有热带大气自身的物理本质^[1]。正如我们所知道的，热带大气常可处于条件不稳定状态，有利于对流活动的发展；同时，由于风场水平切变或者因辐射差异而造成的局地辐合、辐散等物理过程，经常可以在热带大气中形成弱的气旋性扰动。当这些弱的扰动同积云对流发生相互促进作用时，可造成一种低压环流和对流活动间的正反馈过程，即产生第二类条件不稳定（CISK）。有关研究表明，通过 CISK 机制，一般最不稳定扰动的半径约为 200—500 公里。因此，我们可以用 CISK 机制来说明热带大气中的涡旋运动。

热带地区一般近似有 $f \sim 10^{-5}$ 秒⁻¹，因此只有对于超长波 ($L \sim 10^7$ 米) 系统，运动才是准地转和准水平无辐散的，而类似于中纬度的长波系统，这一点可视为热带地区多超长波活动的背景条件。大尺度地形（包括海陆分布影响）和准定常热源（汇），无疑是准

静止行星波形成和维持的重要条件，而在准定常加热中，对流凝结加热又是极重要的部分。关于混合罗斯贝一重力波，Holton [2] 的数值模拟试验和我们近来的研究已表明，对流凝结加热通过 CISK 机制，在一定条件下可以驱动混合罗斯贝一重力波等的活动。这进一步说明了对流凝结加热在热带大气运动中的重要作用。

二、对流凝结加热的参数化

前面已指出，积云对流所产生的凝结加热不仅对于热带大气运动有重要作用，而且对于整个大气环流都有影响。但是由于积云的空间尺度很小，要考虑每个积云单体的作用则很困难，因此，人们通常用大尺度系统的物理量来表示积云对流加热的统计效果，这就是所谓积云对流参数化。不同的假定，可以有不同的处理方法，也就出现了不同的参数化方案。

1. 郭晓岚的对数参数化方案

在郭晓岚的参数化方案中 [3]，假定①在低层有辐合的不稳定层结大气中，总会发生积云对流；②在积云中，空气作湿绝热上升运动；③单个云体生命史很短，因此某个积云的存在是瞬时的；④水汽凝结后便立即通过降水而下落，故不考虑再蒸发。

如果云中的温度和混合比分别是 $T_s(z)$ 和 $q_s(z)$ ，而云外四周的空气温度和混合比分别是 $T(z)$ 和 $q(z)$ ，郭晓岚给出对流凝结加热率为

$$Q_e = \begin{cases} c_p b(z) (T_s - T) & \text{对于 } T < T_s, \text{ 或 } M > 0 \\ 0 & \text{对于 } T \geq T_s, \text{ 或 } M < 0 \end{cases} \quad (13.1)$$

式中 $b(z)$ 是积云的产生率（即单位时间内积云产生的个数）或积云面积的覆盖比。 M 是进入单位截面空气柱的水汽量。由于环境量 $T(z), q(z)$ 和风场可认为是已知的，因此，

进入空气柱的水汽量可用下式计算：

$$M = \frac{c_p V_0}{H^*} (q_e - w_0) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^1 r q V d\zeta \quad (13.2)$$

式中 $\zeta = p/P$ 为垂直坐标， $H^* = RT_0/g$ ， c_p 为拖曳系数， w_0 和 V_0 分别为近地面大气参考层的混合比和风速， q_e 是海面温度下的饱和比湿。（13.2）式右端第一项是地面蒸发引起的水汽量的增加，第二项主要是平流所导致的水汽量的增加。一个单位面积上形成一块模式云所需水汽量为

$$M_1 = \int_0^1 \left[\frac{c_p}{L} (T_s - T) + (q_s - q) \right] d\zeta \quad (13.3)$$

式中 L 为凝结潜热。这样，即可得到积云产生率 $b(z) = M/M_1$ 。

上述方案考虑了一些积云内的物理特性，估计了加热的垂直分布，方法比较简单，并且不必考虑云的物理过程。但尚未考虑卷挟作用，也未考虑液态水的再蒸发，在实际应用中，发现所计算的降水量和热量都偏小，而且分布过份均匀。

2. 荒川 (Arakawa) 的对流参数化方案

荒川 [4] 假定将对流分为穿透性对流、中层对流和低层对流三类，如图 13.1 所示。图中 c 表示从边界进入云中的总的向上质量通量， γc 是云内向上的质量通量， $(\gamma - 1)c$ 是周围空气向云体的水平质量通量。荒川定义两个能量参数：

$$H_c = c_p T + gz + Lq \quad (13.4)$$

$$E_n = c_p T + gz + Lq_e \quad (13.5)$$

对于湿绝热过程， E_n 为常数；对于干绝热过程， $c_p T + gz$ 为常数。比较 H_c 和 E_n 可以得到对流不稳定的条件。穿透性对流发生的条件为 $H_{c1} > E_{n3} > H_{c2}$ ，显然，对流发生在边界层，积云穿过等压面 3 和 2 之间的稳定层。中层对流发生的条件为 $H_{c2} > H_{n3}$ ，这要

求在第2层上有充足的水汽。低层对流发生的条件为 $E_{n_3} > H_{c_1} > E_{n_2}$ ，即下层为不稳定，但上层是稳定的。

荒川方案可以考虑挟卷作用（即 $\eta > 1$ ），但具体应用时，必须给定适当的 ηc 值。

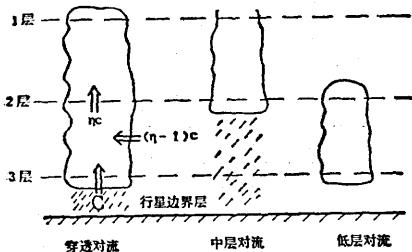


图13.1 对流形式图

上述两种对流参数化方案都在一些数值预报和大气环流模式中应用，并取得了较好的效果。在一些理论研究中人们还常用更简单的参数化方案，如直接用垂直速度或涡度参数化表示对流凝结加热。

三、CISK 和台风的发生发展

1964年 Charney 和 Eliassen [5] 提出了第二类条件不稳定理论，较好地解释了台风的发生发展。CISK 的物理本质是：一个弱的热带低压扰动，由于边界层的摩擦辐合，即通过埃克曼抽吸作用，使潮湿空气强迫抬升，引起积云对流发展，水汽的凝结加热使低压中心气温升高，气压下降，出现指向中心的气流，由于绝对角动量守恒，切向风速增大，低压环流增强，其结果，使对流更加强，凝结加热更厉害，如此循环，造成积云对流与低压环流间的正反馈，使低压不稳定发展。

在轴对称一气压坐标系中，扰动方程可以写成

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -fu \quad (13.6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = fv \quad (13.7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p} \quad (13.8)$$

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(r\omega)}{\partial p} = 0 \quad (13.9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \omega \frac{d\bar{\theta}}{dp} = -\frac{\bar{\theta}}{c_p T} - Q \quad (13.10)$$

式中 u 和 v 分别为法向和切向风速， Q 为单位质量的对流凝结加热率。

由 (13.9) 可引入流函数 ψ ，在两层模式下可以有

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{f(\psi_2 - \psi_0)}{\Delta p} \quad (13.11)$$

$$\frac{\partial v_3}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{f(\psi_4 - \psi_0)}{\Delta p} \quad (13.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{(v_3 - v_1)}{\Delta p} \right) + \frac{R \bar{T}_2}{f p_2 \theta} \frac{\bar{\theta}_3 - \bar{\theta}_1}{\Delta p} \frac{\partial}{\partial r} \quad (13.13)$$

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_2}{\partial r} \right) = -\frac{R}{c_p f p_2} \frac{\partial \theta_2}{\partial r} \quad (13.13)$$

因在模式顶有 $\omega_0 = 0$ ， $\psi_0 = 0$ ，而在下边界存在 Ekman 抽吸，

$$\omega_4 = -\frac{g \rho_4 D_E}{2} (\sin 2\alpha) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_4) \quad (13.14)$$

式中 $D_E = \sqrt{2v/f}$ ， v 为粘性系数， α 是地面风与等压线之交角。上式可写成

$$\frac{\partial \psi_4}{\partial r} = \frac{g \rho_4 D_E}{2} (\sin 2\alpha) \frac{\partial}{\partial r} (r U_4) \quad (13.15)$$

Charney 和 Eliassen 假定对流凝结加热率正比于潮湿空气的辐合，并取

$$Q_2 = \frac{L \mu}{2 \Delta p} (\bar{q}_{e3} - \bar{q}_{e1}) \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \psi_4}{r \partial r} + \frac{\partial \psi_2}{r \partial r} \right) \quad (13.16)$$

式中 L 是凝结潜热， μ 是一个比例因子。这样，由 (13.1) – (13.13) 式取 $\psi = \Psi(r) e^{\sigma t}$ ，最终可以得到关于 Ψ_2 的单一方程。

$$\left[1 - \mu H_c \left(1 + \frac{k}{2\sigma k} \right) \right] r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d\Psi_2}{dr} \right)$$

$$-\lambda^2 \left(\frac{2\sigma + k}{2\sigma + 2k} \right) \Psi_2 = 0 \quad (13.17)$$

对于 $r \leq a$ 的区域，有上升运动，有对流加热 ($H_c > 0$)，则方程可写成

$$r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d\Psi_2}{dr} \right) + \lambda^2 + \Psi_2 = 0,$$

$$\lambda^2_+ = \frac{(2\sigma + k)/(2\sigma + 2k)}{-1 + \mu H_c (2\sigma + 3k)/(2\sigma + 2k)} \lambda^2.$$

对于 $r > a$ 的区域，有下沉运动，没有对流加热 ($H_c = 0$)，则有

$$r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d\Psi'_2}{dr} \right) - \lambda^2_- \Psi_2 = 0,$$

$$\lambda^2_- = \frac{2\sigma + k}{2\sigma + 2k} \lambda^2.$$

最后可得到关系式

$$\frac{J_1(\lambda_+ a)}{J_0(\lambda_+ a)} = i \frac{\lambda_-}{\lambda_+} \frac{H_1(i\lambda_- a)}{H_0(i\lambda_- a)} \quad (13.18)$$

式中 J_0 和 J_1 分别是零阶和一阶贝塞尔函数， H_0 和 H_1 分别为零阶和一阶 Hankel 函数。由 (13.18) 式取热带大气参数，可以求得不同加热条件下增长率与扰动半径 a 的关系，如图 13.2 所示。由图可以看到，对于 $\mu = 0.8$ 、 $a \approx 150 - 200$ 公里，其 e 倍增时间为 2.5 天，这些数值同热带低压发展成台风是比较一致的。

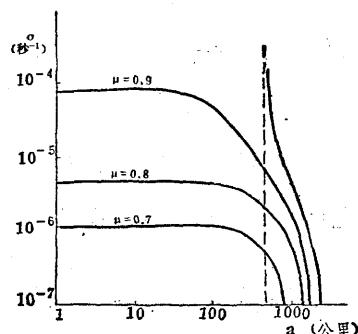


图 13.2 热带低压增长率与云区半径的关系

四、切变基本气流中的 CISK

前面我们讨论 CISK 时，没有考虑基本气流的影响。实际上，基本气流（环境流场）

对于台风的发生发展有着明显的作用。例如，强的基本气流垂直切变往往对台风的发生发展有阻尼作用，这就是台风形成中的所谓“对流层通风条件”。

为了便于引入基本气流，简单地取极对称坐标系，假定基本气流仅随高度线性变化，并满足地转关系，在两层模式下，可以得到不稳定增长率的表达式

$$\sigma = k \frac{(3\mu H - 2)l^2 - \eta - \frac{2l^2 \epsilon_*^2}{(1 - \mu H)l^2 + \eta}}{2[(1 - \mu H)l^2 + \eta] + \frac{2l^2 \epsilon_*^2}{(1 - \mu H)l^2 + \eta}} \quad (13.19)$$

式中 H 是对流加热的参数， ϵ_* 代表垂直切变影响。 $\eta = 2f^2/S_2 \Delta p^2$ ， μ 是大气状态参数，在热带一般有 $\mu = 1.1$ ， S 是 p 坐标下的静力稳定度参数， Δp 是模式分层的气压间隔。

由 (13.19) 式不难看出， ϵ_* 对于不稳定增长率起着削弱的作用。同时， ϵ_* 在式中以平方形式出现，也就是说无论基本气流垂直切变的形式（东风切变或西风切变）如何，对不稳定发展的增长率的影响是一样的。

我们知道，在西太平洋地区，赤道西风或西南季风的加强往往有利于台风的生成和发展。南海台风的发生发展有时又与北方冷空气入侵有关。强冷空气的注入对于台风的启动有“釜底抽薪”的作用，不利于台风的形成。但若冷空气强度适中，则可以促成台风发展，这是因为这类冷空气到达南海后已基本变性，在热力上已没有什么影响，只是在近地面由于气压梯度造成偏东气流的加强。低压南侧偏西气流的加强，以及低压北侧偏东气流的加强，从动力学角度可以用气旋性切变基本气流的引入进行讨论。我们在描写 CISK 机制的两层模式中，考虑对流层低层（用摩擦层顶代替）有气旋性切变基本气流存在。其结果表明，低层气旋性切变基本气流明显地使不稳定发展的增长率增大，有

利于台风的发生发展。图13.3是增长率的计算结果。图中H表示加热参数，实线是无切变基本气流的情况，虚线是有气旋性切变基本气流的情况。

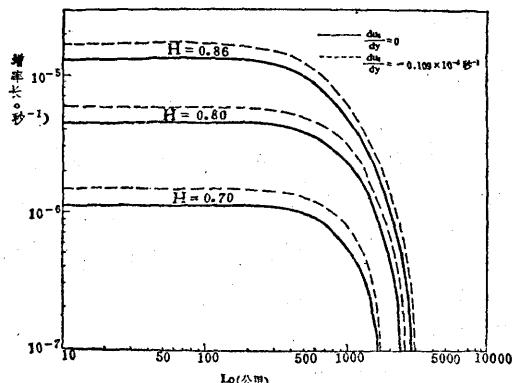


图13.3 对流层低层气旋性切变基本气流对CISK的影响

如果在对流层上层引入切变基本气流，则可以看到，在那里反气旋性切变基本气流有利于台风的发展，而气旋性切变基本气流不利于台风的发展，但其影响比较小，不如低层气旋性切变的作用大。理论与天气分析的结论十分一致。

五、热带辐合带

热带辐合带（ITCZ）是热带大气运动的重要系统之一，在日常天气图上，它表现为对流层中低层的一气流汇合带，在卫星云图上它表现为由多个对流云团和涡旋排列组成的一条云带。它本身就是造成热带降水的主要天气系统之一，而台风一类强烈灾害性天气系统的发生发展又常与 ITCZ 的活动关系密切，因此，有关 ITCZ 的研究一直为气象工作者所重视。有关 ITCZ 的形成和维持机制，也有不少讨论，归结起来可分为两方面，其一是 ITCZ 存在的平均纬度位置，其二是它的平均宽度。

一些研究表明^{[6]、[7]}，在热带大气的

边界层中，其垂直速度的最大值一般出现在纬度 7—10°，因而使 ITCZ 一般在纬度 3—15° 处活动，平均情况是出现在纬度 10° 附近。ITCZ 是由一些强的对流活动体排列组成的，因此可以把 CISK 机制引入 ITCZ 的研究。Charney^[8] 将边界层的 Ekman 抽吸作用同积云对流活动结合起来，对流凝结加热，通过 CISK 机制计算得到 ITCZ 的半宽度约为 300 公里，其结果大体同天气分析所看到的 ITCZ 半宽度差不多。

参考资料

- [1] 李崇银，热带大气运动的尺度，科学探索，1982年第3期。
- [2] Holton, J.R.J. Atmos. Sci., 29 (1972), 368—375.
- [3] Kuo, H.L., J. Atmos. Sci., 31(1974), 1232.
- [4] Arakawa, A., Proc. WMO/IUGG. Symp., On numerical Weather Prediction, in Tokyo, 1969.
- [5] Charney, J., and A. Eliassen, J. Atmos. Sci., 21 (1964), 68—75.
- [6] Holton, J. R., J. Atmos. Sci., 28(1971), 275—283.
- [7] Kuo, H.L., J. Atmos. Sci., 30(1973), 53—65.
- [8] Charney, J., Mathematical Problems in the Geophysical Sciences, 1971.

《农用气象》丛书征稿启事

为了适应广大农民学科学用科学指导生产的需要，气象出版社决定组织编写出版一套《农用气象》丛书。这套丛书力求帮助农民探索和解决生产中所遇到的气象问题，内容上要紧密结合农、林、牧、副、渔各业的生产，以问答形式解释有关气象问题。为了方便农民阅读，要求每册精选几十个问答，字数在四万字以内，讲究应用，通俗易懂。

这套丛书从即日起至四月底止在全国征稿，欢迎广大从事农业工作和气象工作的科技人员、教学人员以及生产第一线的农业人员踊跃投稿。征稿简则，请向北京白石桥路气象出版社编辑部函索。