

# 台风的数值模拟研究——积云动量输送作用\*

李崇银

(中国科学院大气物理研究所)

张铭

(南京空军气象学院)

## 提 要

本文用一个考虑积云动量垂直输送作用的二维轴对称原始方程模式,模拟了台风的生成和发展过程。数值试验所得到的“模式台风”比考虑 Ekman 抽吸作用所得结果在其结构上更接近实际台风。因此,同 Ekman 抽吸一样,积云动量垂直输送作用也可以激发第二类条件不稳定(CISK),促使台风的生成和发展。而且,积云动量垂直输送作用,在台风的形成和维持中可能比 Ekman 抽吸更为重要。

## 一、引 言

台风是热带大气中的一种严重灾害性天气系统,人们一直很注意它生成的物理动力机制。很早以前人们已注意到大部分台风是由热带低压扰动逐渐发展起来的,而且,潮湿空气的潜热释放对台风的发生发展有极重要的作用。但直到 Charney 等<sup>[1]</sup>提出第二类条件不稳定(CISK)概念,才较好地地从理论上解释了由热带扰动变为深厚涡旋——台风的动力学机理。Charney 以及其它研究者关于台风发生发展的研究都基于大气边界层的摩擦辐合,即 Ekman 抽吸作用。但是,近年来从卫星云图发现,一些台风也可以由热带云团发展而成;台风辐合场的计算又表明,边界层的辐合量并不占绝对优势,900毫巴以上空气辐合量仍有相当大的分量。因此可能还有别的机制促使台风的生成和发展,值得探索。

积云对流的发展,一方面可以释放凝结潜热,为台风的发生发展提供最基本的能量;另一方面,深厚积云的发展还可以造成动量的垂直输送。Schneider 和 Lindzen 曾用简单的办法研究过深厚积云对流所造成的水平动量的垂直混合<sup>[2]</sup>,近来,这种积云动量输送作用已愈来愈引起人们的注意。动量的垂直输送虽然会消耗低压扰动的动能,但另一方面,积云动量的垂直输送还可以导致一种次级环流的产生,增强垂直运动。这是因为,根据 Eliassen 的研究<sup>[3]</sup>,对于一个平衡涡旋,如果在旋转轴方向摩擦矩有改变,那么流体质点在摩擦矩大的地方将离开旋转轴运动,而在摩擦矩小的地方流体质点将向旋转轴运动。我们可以把热带低压近似地看作一个平衡涡旋,积云动量混合可以在其上层引起一个气旋性摩擦矩,而在下层引起一个反气旋性摩擦矩,从而在低层产生流入气流,在高层产生流出气流。这样,积云动量输送的结果,便产生了一个垂直二级环流。

\* 本文于 1983 年 7 月 20 日收到, 1983 年 12 月 8 日收到修改稿。

基于上述概念, Mak<sup>[4]</sup>认为积云动量混合同 Ekman 抽吸一样, 可以促成积云对流和天气尺度低压扰动间的相互作用, 形成正反馈, 产生第二类条件不稳定, 使台风得以发生发展。

本文在一个轴对称的原始方程台风模式中引入积云动量输送作用, 代替 Ekman 抽吸, 从一个弱的低压扰动开始, 对台风的生成和发展进行了数值模拟研究。

## 二、数 学 模 型

根据 Schneider 和 Lindzen 的研究, 积云动量混合的影响可以用积云摩擦来描写, 即

$$\vec{F}_c = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} [M_c (\vec{V} - \vec{V}_c)] \quad (1)$$

这实际上是一种参数化表达式, 其中  $M_c$  是积云垂直输送的质量通量,  $\vec{V}$  和  $\vec{V}_c$  分别为周围环境和积云内空气的水平风速,  $\rho$  是大气密度。

公式(1)类似于 Arakawa 和 Mintz<sup>[6]</sup> 所给出的格式。Schneider 和 Lindzen 在得到(1)式时有两个主要假定, 其一是活跃积云在整个环境中只占很小的面积, 从而可以把云和环境分别处理, 其二是云内垂直速度很大, 云中空气在上升过程中将来不及改变自己的速度, 从而  $\vec{V}_c$  可以看作常数, 一般可以用云底的环境空气的速度代替  $\vec{V}_c$ 。在热带大气中, 上述两个假定一般是可以接受的, 因为深厚的活跃性积云不仅所占面积不大, 且其中的垂直速度也非常大。

取柱坐标  $(r, \theta, \xi, t)$  中静力平衡下的轴对称的原始方程组为:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \dot{\xi} \frac{\partial v_r}{\partial \xi} = v_\theta \left( f + \frac{v_\theta}{r} \right) - \frac{\partial \phi}{\partial r} - H \frac{\partial P}{\partial r} + D_r + F_{cr} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \dot{\xi} \frac{\partial v_\theta}{\partial \xi} = -v_r \left( f + \frac{v_\theta}{r} \right) + D_\theta + F_{c\theta} \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v_r \frac{\partial H}{\partial r} + \dot{\xi} \frac{\partial H}{\partial \xi} = \kappa H \left( \frac{\dot{\xi}}{\xi} + \dot{P} \right) + Q + D_H \quad (4)$$

$$\dot{P} \equiv \frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + v_r \frac{\partial P}{\partial r} = - \left( \frac{\partial r v_r}{r \partial r} + \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial \xi} \right) \quad (5)$$

$$H \equiv RT = -\xi \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \quad (6)$$

这里  $v_r, v_\theta$  分别是径向和切向风速,  $\dot{\xi} \equiv \frac{d\xi}{dt}$  为垂直速度,  $\xi = p/p_s$ ,  $p$  为气压,  $p_s$  为地面气压,  $P \equiv \ln p_s$ ,  $T$  为气温,  $R$  为气体常数,  $\kappa = R/C_p$ ,  $Q$  是对流凝结加热,  $F_{cr}$  和  $F_{c\theta}$  是积云摩擦引起的动量交换, 由(1)式表示,  $D_r$  和  $D_\theta$  为湍流摩擦项,  $D_H$  为湍流垂直交换项, 分别由下式表示:

$$D_r = K_H \left( \nabla_2^2 v_r - \frac{1}{r^2} v_r \right) + K_c \frac{\partial^2 v_r}{\partial \xi^2} \quad (7)$$

$$D_\theta = K_H \left( \nabla_2^2 v_\theta - \frac{1}{r^2} v_\theta \right) + K_c \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \xi^2} \quad (8)$$

$$D_H = K_H \nabla_2^2 H + K_c \frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} \quad (9)$$

其中  $K_H$  和  $K_z$  分别是水平扩散和垂直扩散系数,  $\nabla_r^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ .

关于对流凝结加热,一般都假定其与潮湿空气的辐合量成正比。因此,在考虑 Ekman

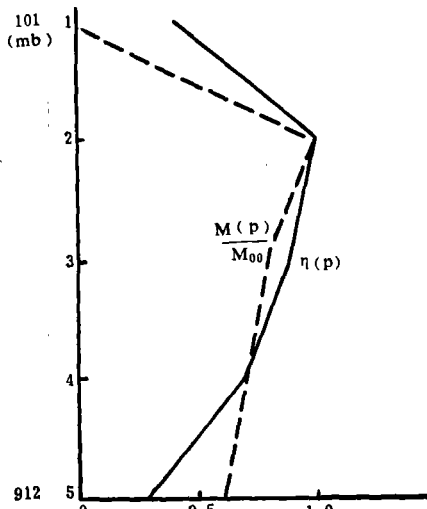


图 1 积云质量通量  $M(p)$  和加热函数  $\eta(p)$  的参考廓线

抽吸作用时,人们常用边界层顶的垂直速度(有的就用某高度层的垂直速度)参数化来表示它。近来 Mak 的研究表明,在 CISK 机制中用涡度参数化表示对流凝结加热比用垂直速度参数化表示更为合理<sup>[6]</sup>。故在本文中,我们假定对流凝结加热与某参考层的积云质量通量和涡度有关,即,

$$Q = \alpha Q_0 \eta(p) M_* \xi_* \quad (10)$$

其中  $\eta(p)$  是加热垂直分布函数;  $M_*$  和  $\xi_*$  分别为某参考层的积云质量垂直通量和涡度;  $Q_0$  为一比例常数;  $\alpha$  为加热调节参数,不同的  $\alpha$  值可以表示不同强度的对流加热。

根据已有的结果,我们取积云垂直质量通量  $M(p)$  和加热分布函数  $\eta(p)$  如图 1 所示,它们代表了台风的一般特征。参照文献<sup>[4]</sup>,取  $M_{00} = 5$  毫巴/小时。

### 三、计算格式

本文的计算格式与文献<sup>[7]</sup>完全一致,其特点可以简述如下:

空间差分在垂直方向取五层,按  $\xi$  作等距划分,  $\Delta\xi = 0.2$ , 而  $\xi = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  分别对应于层数  $K = 1, 2, 3, 4, 5$ 。  $v_r, v_\theta, H$  定义在上述层次上,而  $\phi, \xi$  则定义在上述各层次之间。沿径向取等距格点(共 21 个格点,即  $j = 0, 1, 2, \dots, 20$ ),格距  $\delta = 50$  公里。

为了节省计算时间,我们采用分解算法,对适应过程和平流过程分别进行计算。适应过程的时间步长取为 120 秒,每算三步适应过程再算一步平流过程,算平流过程的时间步长取为 360 秒。边界条件在  $r = 0$  处有  $v_r, v_\theta$  等于 0, 在  $r = 1000$  公里处为绝热刚壁条件。垂直方向上,考虑在上边界上垂直速度为 0, 在下边界考虑有海面的拖曳和感热,具体处理参见文献<sup>[7]</sup>。

初始条件可以任意给定,本文中初始温度场取为气候平均值,即取  $T_1 = -77.9^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -35.0^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = -5.4^\circ\text{C}$ ,  $T_4 = 9.9^\circ\text{C}$ ,  $T_5 = 21.8^\circ\text{C}$ , 海温  $T_s = 28.0^\circ\text{C}$ 。海平面初始气压场取为一个低压,中心为 1005 毫巴,与此相适应,初始风场取为一气旋性环流,最大切向风速在第五层距中心约 300 公里处,为 11.5 米/秒,而初始径向风速为零。

在对流凝结加热  $Q$  的计算中取模式第 4 层为参考层,即用第 4 层的积云质量通量  $M_4$  代替  $M_*$ , 用第 4 层的涡度  $\xi_4$  代替  $\xi_*$ 。在  $\vec{F}$  的计算中取模式底层 ( $K = 5, 900$  毫巴) 为积云底,即有  $\vec{V}_0 = \vec{V}_5$ 。

## 四、实验结果

### 1. 模式台风的形成

图 2 给出了不同对流加热强度下模式台风低压中心附近( $j=1$ 处)切向风速和地面中心气压随时间的变化。其中  $\alpha=3.6$  大致相当于最大对流凝结加热为每日  $20^{\circ}\text{C}$ ，约相当于 84 毫米日降雨量所释放的潜热。由图可见，在这种强度的对流加热条件下，低压得到极为迅速的发展，48 小时后，中心附近最大风速由约 6 米/秒增大到了 46 米/秒，已经达到了强台风的强度；地面气压也有所降低，48 小时降压 8 毫巴，同过去有关台风形成的数值模拟相比，水平风速迅速增大的趋势是相同的，与实际台风也很相近。但地面气压下降的趋势缓慢了些，表明边界层摩擦(本文未计入)，即 Ekman 抽吸作用，对台风形成，特别是地面气压的下降过程，有相当作用。当降低  $\alpha$  时，则系统的发展减慢，当  $\alpha$  降为 1.8 时，系统一般发展不成台风。说明强烈的对流凝结加热是台风发生发展的关键。然而，对流凝结加热要通过对环流的正反馈过程，才能导致气旋的加深发展，本文中在反馈过程里起纽带作用的是积云的动量输送。

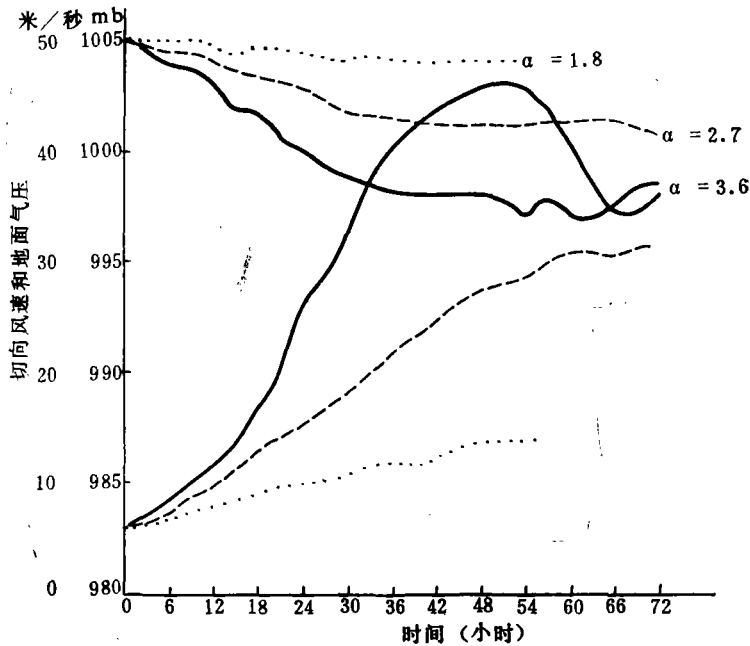


图 2 模式台风低压中心地面气压和第 5 层上中心附近切向风速随时间的变化

图 3 是模式第 5 层在不同时间时切向风速的径向分布。可以看到，随着计算时间的增加，气旋性环流的迅速发展颇为清楚，而且最大风速带随时间增加向中心收缩的特点也很明显。正是在这种能量集中的过程中，涡旋得以迅速发展，形成模式台风。这种过程与实际台风的形成相当一致。图 4 是第 3, 12, 24 和 48 小时第 5 层的向中心的径向风速的变化情况。显然，向中心的低层辐合气流的建立相当迅速，而台风形成过程中主要是中心附近约 200 公里范围内辐合的加强。这与实际台风的情况很一致，那些地方正是螺旋云

带活动区,不仅切向风速很大,而且有较强的流入气流。

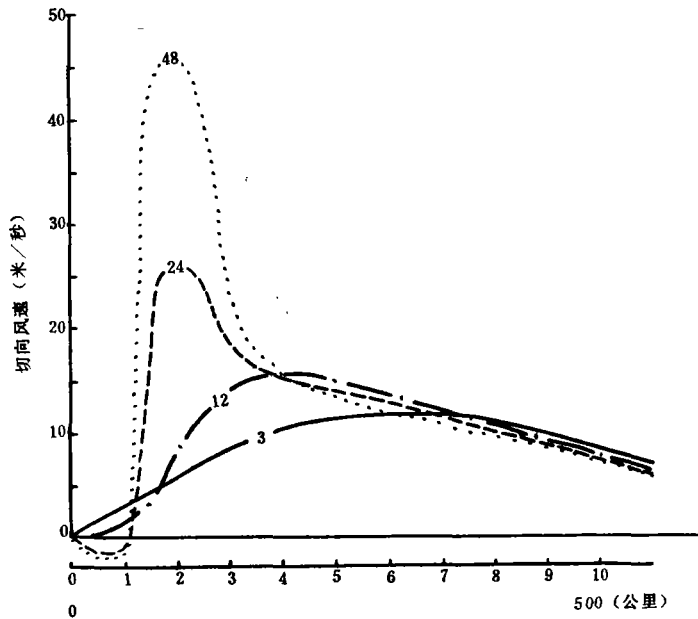


图 3 模式台风低压在 3, 12, 24 和 48 小时第 5 层上切向风速的径向分布

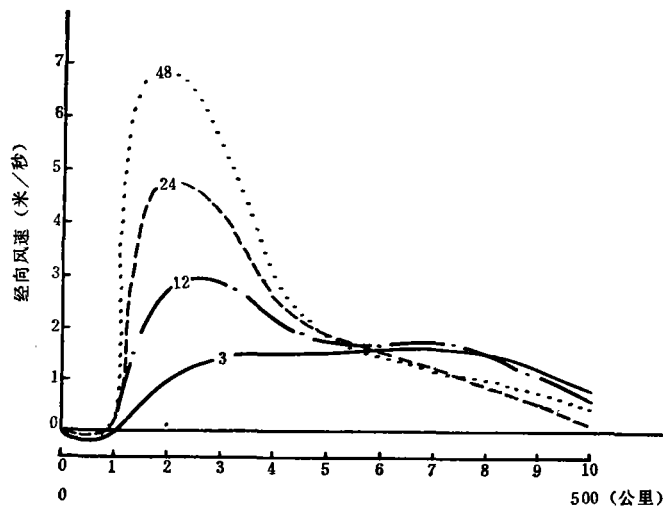


图 4 模式台风低压在 3, 12, 24 和 48 小时第 5 层上径向辐合气流的分布

关于台风的生成,暖心的建立是很重要的。图 5 给出了模式第二层上沿径向不同点扰动温度随时间的变化。可以看到,紧靠中心附近处(图上  $j=1$  和  $j=4$ )增温最强;而且 18 小时前增温极快,若将温度随时间变化与风速随时间变化相比较,可以发现,在模式台风形成的初期,中心附近的增温非常急骤,这从另一角度也表明台风是一种由热力(对流凝结加热)驱动的涡旋系统。

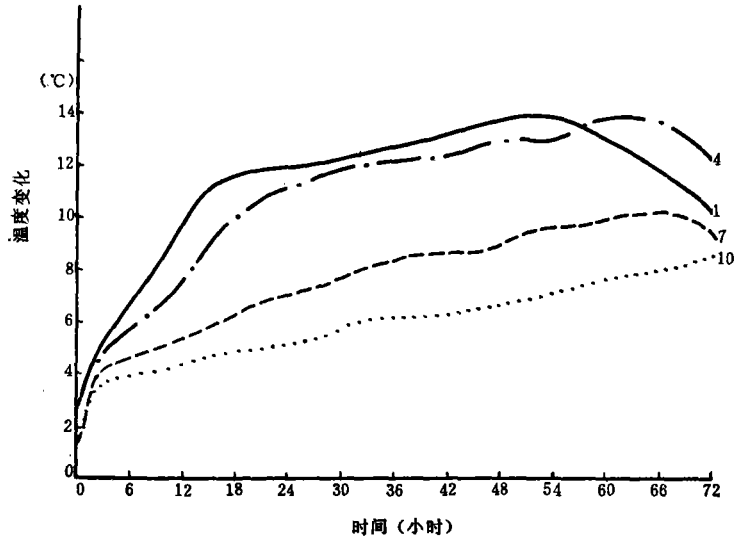


图 5 模式台风低压在  $K=2$  层上不同地方的温度随时间的变化

## 2. 模式台风的结构

下面着重讨论在考虑积云动量混合情况下模式台风的结构。图 6 是 48 小时模式台风垂直速度场的分布,同考虑 Ekman 抽吸作用的模式台风(图 7)相比,有以下三点值得提出:首先,最大上升运动并不在台风中心,而是在中心之外的约 50 公里附近;其次,在台风中心,对流层中部出现了极其微弱的下沉运动,即出现了“台风眼”特征;第三,沿径向其上升运动区和下沉运动区相间出现。上述三个特点同实际台风中垂直运动场以及对流云带的分布有极其相似之处。因为在台风眼区一般都认为有弱的下沉气流,而最强上升运动区则与台风的云墙相对应。

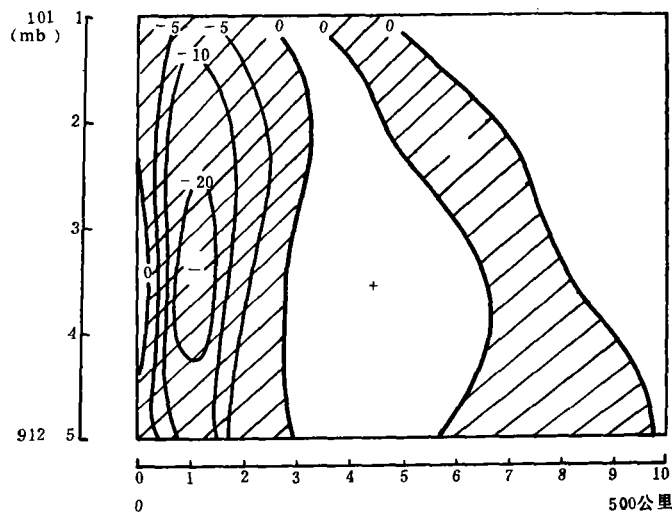


图 6 模式台风的垂直速度( $\xi$ )剖面分布( $10^{-6}$ 秒 $^{-1}$ )

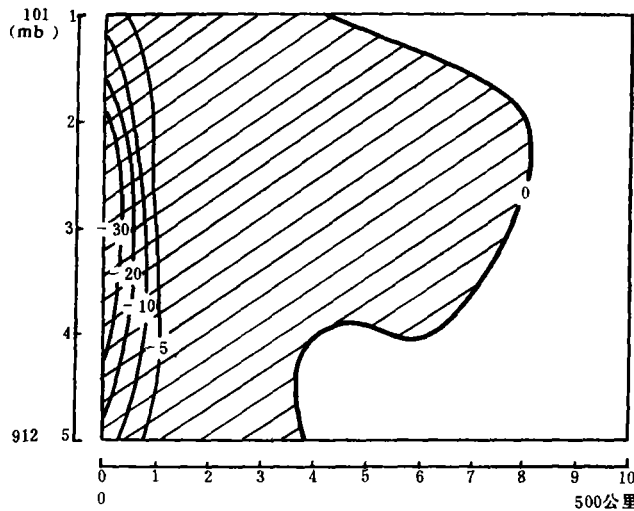


图 7 考虑 Ekman 抽吸时,模式台风的垂直速度( $\dot{z}$ )剖面分布( $10^{-4}$ 秒 $^{-1}$ )

图 8 给出了模式台风 48 小时的切向风速场分布。对流层下层有强的气旋性环流,而对流层上层为反气旋环流,这同考虑 Ekman 抽吸作用的情况一致。值得指出的是,在现在讨论的情况下,模式台风中心区明显地存在着一个弱风区,第 5 层(900 毫巴左右)上风速仅 1.6 米/秒;气旋性最大切向风速随高度减弱得比较少,第 5 层为 45.6 米/秒,而第 3 层(500 毫巴左右)仍有 32.5 米/秒;对流层低层切向风速的径向分布并非自最大风速带向外一致减小,而是存在着大小相间的风场。以上几点与考虑 Ekman 抽吸的模式台风有所不同,但却更符合实际台风的情况。

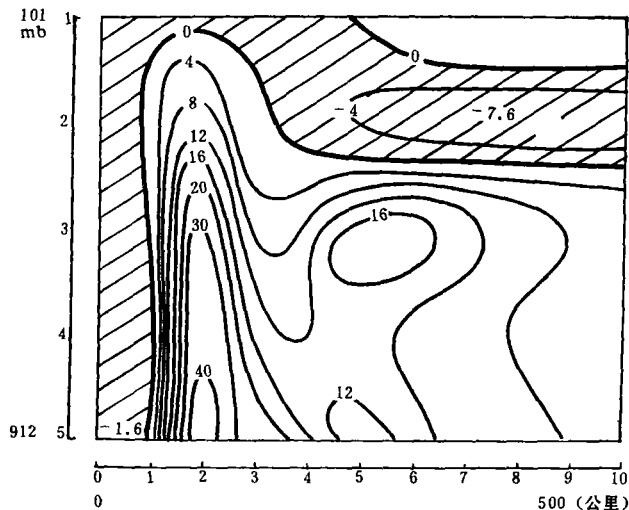


图 8 模式台风切向风速(米/秒)剖面

在径向风速剖面图上(图略)可以看到,随着模式台风的发展,对流层低层仍有相当强的向中心的流入气流,与考虑 Ekman 抽吸作用的模式不同的是在对流层中层也有明显的

流入气流，这正反映了积云动量混合的作用。

在模式台风 48 小时的扰动温度的分布图上(图略)，台风的暖心结构是很清楚的，这与已有的研究结果一致。但是暖心结构本身又是很复杂的，首先，模式台风中最大增温出现在对流层上部约 300 毫巴左右，且极值并不在中心而是在距中心约 150 公里处；第二，对流层低层的最大加热也出现在距中心 100—150 公里处，强度比高层要弱得多；第三，对流层顶附近有弱的降温区存在。温度场的上述分布特征与考虑 Ekman 抽吸作用的模式台风有所差别，在那里，最大增温出现在模式台风的中心。显然，本文的结果更类似实际台风的结构。

## 五、结 束 语

本文同已有的台风数值模拟试验不同，模式中不计及 Ekman 抽吸而考虑积云动量垂直输送。在试验的初始时刻，既没有径向运动，也没有垂直运动，仅仅有气旋性切向气流，但通过积云对流造成的凝结加热和积云对流造成的垂直动量输送，在模式中产生了次级环流(低层径向辐合，中心附近上升，高层辐散流出)和对流层中上层增暖。结果，地面气压下降，切向风速增大，低压得到发展。低压涡旋的发展又使垂直运动进一步增强，积云对流更旺盛，凝结加热和积云动量输送更强，……。正是这种积云对流与低压环流相互间的正反馈过程，使模式台风得以形成和发展。本文的数值试验完全证实了理论上的结果，即积云的动量垂直输送作用同 Ekman 抽吸一样，可以产生第二类条件不稳定，促使台风的生成和发展。

考虑积云动量垂直输送作用，所得的“模式台风”在结构上比考虑 Ekman 抽吸的结果更接近实际。例如，最大上升运动和最大加热在中心之外而并非在中心处；切向风速随高度减弱比较缓慢；在中心处，对流层中层有弱的下沉运动；等等。这无疑表明，积云动量输送作用使模式台风的结构更合理，亦即对台风结构有突出作用。积云动量输送作用不但能形成模式台风，而且其结构比考虑 Ekman 抽吸的结果更合理，因此可以初步认为，积云动量输送作用在台风发生发展过程中有可能比 Ekman 抽吸更为重要。

本研究得到的“模式台风”的中心气压比较高，同实际台风有些差异。然而，当模式考虑 Ekman 抽吸时，所得模式台风的中心气压下降比较显著。两种情况的比较告诉我们，对流层低层的摩擦辐合，即 Ekman 抽吸作用，在台风的形成中，特别是对地面气压的降低有重要作用。因此，可以认为，对于台风的生成和发展，积云动量垂直输送和 Ekman 抽吸都有重要影响，需要一併考虑。

本文的数值试验中我们简单地取了积云垂直质量通量  $M$ 。不随时间变化，但由于切向风速(亦即涡度)是随时间变化的，因此，动量垂直输送，对流凝结加热和低涡的发展都是随时间变化的(加强)。当然，若考虑  $M$  随时间变化更好，那时对流的加强，涡旋的发展都将会更迅速。

## 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] Schneider, E. K. and R. S. Lindzen, A discussion of the parameterization of momentum exchange:



- by cumulus convection, *J. Geophys. Res.*, **81**, 3158—3160, 1976.
- [3] Eliassen, A., Slow thermally or frictionally controlled meridional circulations in a circular vortex, *Astro. Norvegia*, **5**, 19—60, 1952.
- [4] Mak, M., On the growth of the hurricane depression induced by cumulus momentum mixing, 13th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, 1980.
- [5] Arakawa, A. and Y. Mintz, The UCLA atmospheric general circulation model, Dep. of Meteorol., Univ. of Calif., Los Angeles, 1974.
- [6] Mak, M., An inquiry on the nature of CISK. Part I, *Tellus*, **33**, 351—537, 1981.
- [7] Zhang Ming and Zeng Qingcun, the Numerical Simulation of Typhoon, Proceedings of The Second Asian Congress of Fluid Mechanics, Science Press, Beijing, 1983, 912—917.

## THE NUMERICAL SIMULATION OF TYPHOON —THE EFFECT OF CUMULUS MOMENTUM TRANSPORT

Li Chongyin

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Zhang Ming

(*Air Force Institute of Meteorology*)

### Abstract

In a 2-dimensional axial symmetrical primitive equation model, the effect of cumulus momentum transference is studied. We assume that the convective heating are related to the vorticity and the vertical flux of cumulus mass at a certain level. The simulated typhoon got in this paper is closer to the actual typhoon on the structure than the result obtained with Ekman pumping. Therefore, it is similar to Ekman pumping that the cumulus momentum transport can arouse the conditional instability of the second kind (CISK) which leads to the genesis and development of typhoons. Probably, the cumulus momentum transport is more important to the formation and maintenance of typhoons than the effect of Ekman pumping.