

# 风场和热源的垂直分布廓线对台风发展影响的数值试验\*

张 铭

(空军气象学院)

## 提 要

本文用柱坐标中原始方程的五层对称模式, 讨论了风场垂直切变和热源的垂直分布对台风发生发展的作用。用定常热源做的试验表明台风上层的反气旋环流是台风发展的结果。初始风场的垂直切变不利于台风的发展。台风的发展与热源的垂直分布有很大关系。热源的垂直分布廓线若为下大上小的形式, 则有利于台风发展。

## 一、引 言

众所周知, 风场的垂直切变对台风的生成和发展有着重要的影响。一种观点认为台风的生成和发展, 高层的反气旋环流起着关键的作用。一个热带扰动, 若低层为气旋环流, 高层为反气旋环流, 则有利于中心附近上升运动的加强, 这将促使积云对流的发展和凝结潜热的释放, 加快台风的生成和发展。另一种观点, 则认为上层的反气旋环流是台风发展后角动量需满足约束的结果。若初始时风速垂直切变过大, 则不利于系统高层暖心的建立和加强, 台风反而不易发展<sup>[1]</sup>。因而很有必要用数值试验来研究此问题。

台风的发展是非绝热过程, 热源(凝结潜热)随高度的分布, 即加热的垂直廓线对其有明显的影晌。为此我们对不同的加热廓线也做了数值试验。

以上试验可归结为风场和热源的垂直分布廓线如何影响台风暖心结构的问题, 而暖心的强弱又决定了台风的地面中心气压  $p_{s0}$  和最大切向风速  $v_{0max}$ 。

## 二、计 算 模 式

### 1. 基本方程组及计算方法

基本方程组及计算方法与 [2] 中的对称模式相同, 为方便再简述如下, 模式采用柱坐标中轴对称的原始方程, 且设运动满足静力平衡, 即有:

\* 本文于 1983 年 7 月 14 日收到, 1984 年 2 月 29 日收到修改稿。

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \dot{\xi} \frac{\partial v_r}{\partial \xi} = v_\theta \left( f + \frac{v_\theta}{r} \right) - \frac{\partial \phi}{\partial r} - H \frac{\partial P}{\partial r} + D_r \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \dot{\xi} \frac{\partial v_\theta}{\partial \xi} = -v_r \left( f + \frac{v_\theta}{r} \right) + D_\theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v_r \frac{\partial H}{\partial r} + \dot{\xi} \frac{\partial H}{\partial \xi} = \kappa H \left( \frac{\dot{\xi}}{\xi} + \dot{P} \right) + Q + D_H \quad (3)$$

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

$$H \equiv RT = -\xi \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \quad (5)$$

在此  $\xi = p/p_s$ ,  $p$  为气压,  $p_s$  为地面气压,  $P = \ln p_s$ ,  $\dot{P} \equiv \frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + v_r \frac{\partial P}{\partial r}$ ,  $R$  为气体常数,  $\kappa = R/C_p$ ,  $D_r = K_H \left( \nabla_2^2 v_r - \frac{1}{r^2} v_r \right) + K_\xi \frac{\partial^2 v_r}{\partial \xi^2}$ ,  $D_\theta = K_H \left( \nabla_2^2 v_\theta - \frac{1}{r^2} v_\theta \right) + K_\xi \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \xi^2}$ ,  $D_H = K_H \nabla_2^2 H + K_\xi \frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2}$ ,  $\nabla_2^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ ,  $Q$  为热源项, 具体形式后面给出。

模式的差分格式如下: 在垂直方向按  $\xi$  等距分为 5 层,  $K=1, 2, 3, 4, 5$ , 其相应的  $\xi$  为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9。量  $v_r, v_\theta, H$  定义在这些层次上而  $\phi, \dot{\xi}$  定义在二层之间。垂直差分格距  $\Delta \xi = h = 0.2$ , 水平方向取 21 个格点,  $j=0, 1, 2, 3, \dots, 20$ , 格距  $\Delta r = 50$  公里, 所有的变量都定义在同一格点上。计算中采用了分解算法对适应过程和平流过程分别进行计算。适应过程时间步长  $\tau_1 = 120$  秒, 平流过程的时间步长  $\tau_2 = 3 \tau_1 = 360$  秒。

## 2. 边条件和初条件

外边界取在  $j=20$  处, 即在距中心 1000 公里处, 取为绝热刚壁边条件且设  $v_\theta$  为一个很小的正数。在圆柱中心则取  $v_r = 0, v_\theta = 0$ 。在下边界加了海面的拖曳和感热。

初始温度场取气候平均值, 各层的温度为:  $T_1 = -77.9^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -35.0^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = -5.4^\circ\text{C}$ ,  $T_4 = 9.9^\circ\text{C}$ ,  $T_5 = 21.8^\circ\text{C}$ , 海温  $T_s$  取为  $28.0^\circ\text{C}$ 。初始地面气压场和  $v_\theta$  场取以下三种方案:

方案 1: 初始地面气压场取常值 1010 mb, 初始风场在底层取为气旋, 上层取为弱反气旋, 最大风速在离中心 200 公里处的底层 ( $K=5$  层), 其值为 15 米/秒, 在格点上的  $v_\theta$  具体形式如下:

$$v_{\theta, j, k} = 1.25 \cdot (k-2) \cdot j \cdot \exp(0.5 - j^2/32) \quad (6)$$

方案 2: 初始地面气压场同上, 初始风场取为强度不随高度改变的气旋, 底层的风速分布与方案 1 底层的风速分布相同, 即取:

$$v_{\theta, j, k} = 3.75 \cdot j \cdot \exp(0.5 - j^2/32) \quad (7)$$

在此注意到方案 2 的风场无垂直切变而方案 1 的则有垂直切变。方案 1 和方案 2 初始风场与气压场不相适应。

方案 3: 初始地面气压场取为一个低压, 中心为 1004 mb, 外围为 1010 mb, 初始风场取得与此气压场和温度场满足梯度风平衡关系, 此时是一个气旋, 最大风速在底层距中心 200 公里处, 为 14 米/秒, 向上风速略减小, 至最上层减为 11 米/秒。

### 3. 热源 Q 的取法

Q 为热源项,对实际台风,凝结潜热是主要的热源。在我们的模式中为了突出风场和热源垂直廓线的影响而取 Q 为定常,其在格点上的值为:

$$Q_{j,k} = \eta \cdot F_1(j) \cdot F_2(k) \quad (8)$$

在此  $F_1(j)$  为水平分布函数,  $F_2(k)$  为垂直分布函数,即热源的垂直分布廓线。  $\eta$  为比例系数。  $F_1(j)$  和  $F_2(k)$  的具体表达式后面再给出。

在模式中用到的参数为:  $f = 5 \times 10^{-5} \text{ 秒}^{-1}$ , 拖曳系数  $C_D = 1.2 \times 10^{-3}$ ,  $K_H = 10^2 \text{ 米}^2 \text{ 秒}^{-1}$ ,  $K_C = 10^{-9} \text{ 秒}^{-1}$

### 三、风场垂直切变对台风发展的影响

取热源,

$$Q_{j,k} = 0.1 \cdot (1 + \exp(-j^2/16)) \cdot \exp(-j^2/25) \cdot F_2(k) \quad (9)$$

其中

$$F_2(k) = \begin{cases} 1 & k=1,2,3 \\ 0.5 & k=4 \\ 0.25 & k=5 \end{cases} \quad (10)$$

此热源主要集中在距中心 250 公里的范围内,在此范围内其强度大致相当于每日下降 123 mm 雨量所释放的凝结潜热。

我们取第 1, 2 种方案的初始风场进行了数值计算。在开始数小时内进行着风场与气压场的相互适应的过程,以后系统进入演变过程,中心地面气压  $p_o$  下降,地面最大切向风速  $v_{o,max}$  增加。

对于风场无切变的个例(方案 2)12 小时  $p_o$  已降至 998.5 mb,在中高层外围出现了反气旋环流,而近中心的气旋环流则有减弱。中心附近低层  $v_r$  是流入,而高层是流出。垂直运动在近中心是上升而在外围是下沉。至 24 小时则  $p_o$  已降至 990.3 mb,  $v_{o,max}$  出现在底层距中心 50 公里处,其值达 31 米/秒,在高层外围的反气旋环流在增强。 $v_r$  和  $\zeta$  的分布与前面类似,只是强度更大。可以认为此时系统已发展为一个强台风。在 29 小时则  $p_o$  已降至最低点 988.8 mb,  $v_{o,max}$  达 38 米/秒,系统发展到极盛,以后  $p_o$  上升,  $v_{o,max}$  减小,系统开始衰亡(参见图 1)

由此图可见,尽管初始时风场是上下一致的气旋性环流,但随着下层切向风速的增大和最大风速带向中心的移动,在中高层的外围出现了补偿性的反气旋环流(见图 2),且环流强度越来越大。可见反气旋环流是系统发展的结果。

对于风场有切变的个例(方案 1)试验结果总的趋势与方案 2 相同,不再赘述。由图 1 可见此时系统的发展要比方案 2 来得慢,到 29 小时,  $v_{o,max}$  才超过 31 米/秒。在每一时刻,方案 1 的  $p_o$  均比方案 2 要高,  $v_{o,max}$  也小,即对同样的热源初始风场无切变时系统发展要比有切变时来得快。风场的垂直切变不利于台风的发展。

由试验中可见,在热源按以上  $F_2(k)$  垂直分布的情形下,系统最大增温出现在  $k=2$  层(300 mb 左右),这也与实际台风一致。表 1 给了不同时刻  $k=2$  层中心增温值。表上可见在一开始初始风场无切变的情形下,  $k=2$  层中心增温比初始风场有切变的情形略

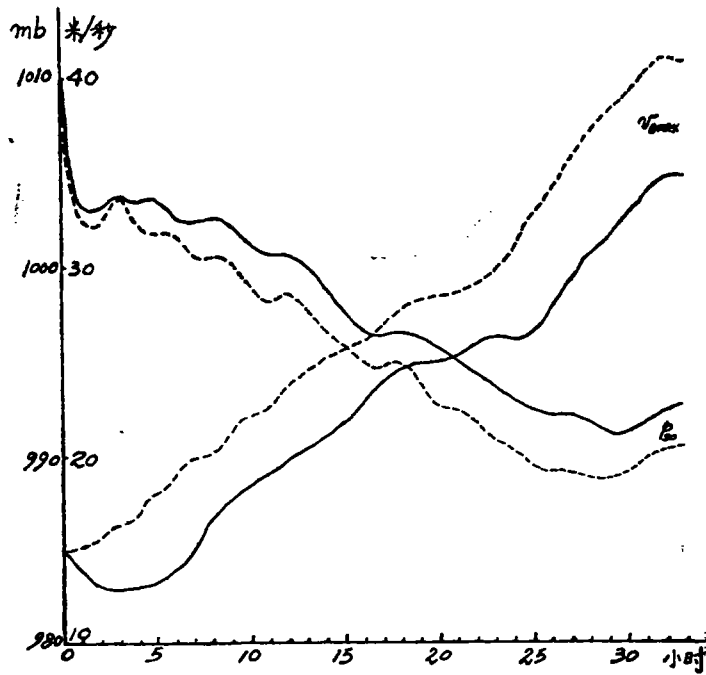


图 1 方案 1 (—) 和方案 2 (---) 的  $p_0$  和  $v_{max}$  随时间变化图

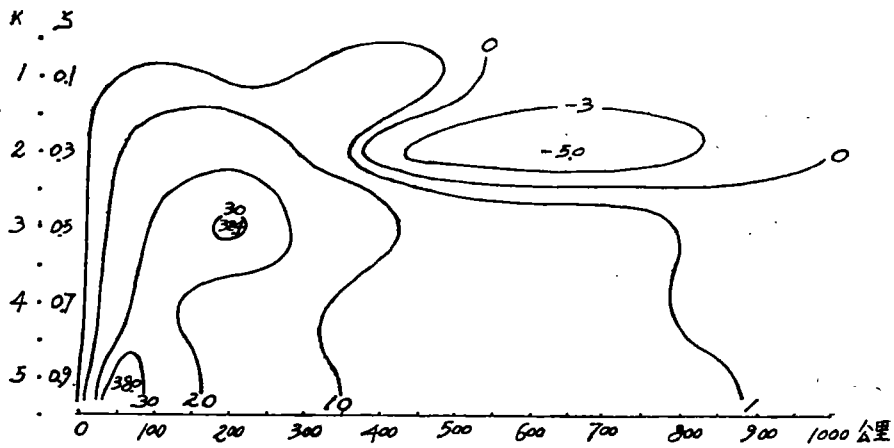


图 2 方案 2, 29 小时  $v_0$  剖面图(单位米/秒)

表 1 不同时刻  $k=2$  层中心增温值(单位 $^{\circ}\text{C}$ )

类 别	增温( $^{\circ}\text{C}$ ) 时 刻	1 小时	3 小时	6 小时	12 小时
	初始风场无切变		1.3	3.1	6.9
初始风场有切变		1.7	3.3	5.3	9.8

慢一些,但到了3小时二者就几乎相等了,以后则情况反过来,无切变情形的增温要比有切变时来得大,这也就是说在3小时后,无切变情形比有切变情形在300 mb附近焓( $C_p T = H/\kappa$ )积累得更多。高层暖心强(焓值高),则地面中心气压低,最大切向风速也大,暖心弱(焓值低)则反之。

#### 四、热源垂直分布廓线对台风发展的影响

台风是个暖心系统,在中高层台风中心的温度比外围要高得多,那么在哪一层热源作用对暖心形成最有影响,也即最有利于台风发展呢?这就要求我们研究热源垂直分布廓线的不同对台风发展快慢的影响。为此做了以下二个数值试验。

##### 1. 试验 1

仍取热源为(9)的形式但取热源垂直分布函数为以下二种不同的形式。

模式 1 取:

$$F_2(1)=1, F_2(2)=0.84, F_2(3)=0.78, F_2(4)=0.76, F_2(5)=0.75 \quad (11)$$

模式 2 取:

$$F_2(1)=0.75, F_2(2)=0.76, F_2(3)=0.78, F_2(4)=0.84, F_2(5)=1 \quad (12)$$

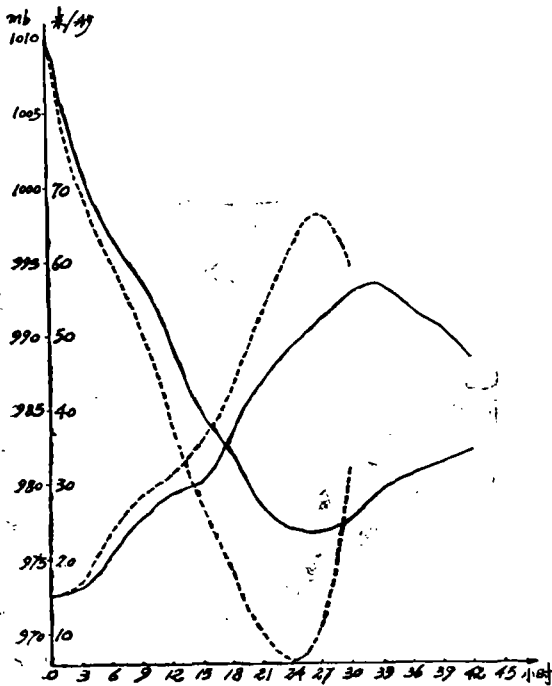


图 3 模式 1 (—) 和模式 2 (---) 的  $p_0$  和  $v_{max}$  随时间变化图

此二热源在垂直方向的加热廓线不同,但在整个气柱内单位时间放出的热量是相同的。均相当于在距中心 250 公里范围内每日下降 134 mm 雨量所释放的凝结潜热。在此我们取上下一致的初始风场(方案 2)进行计算。

由图 3 可见,在任一时刻模式 2 比模式 1  $v_{max}$  要大,  $p_0$  也要低。发展到极盛时,模式 2  $v_{max}$  为 66 米/秒而模式 1 仅为 57 米/秒。模式 2 在中低层近中心的气旋环流和在高层外围的反气旋环流均比模式 1 要强(图略)。模式 2 低层  $v_r$  的流入,高层  $v_r$  的流出及中心附近的垂直速度也均比模式

1 要强(图略)。模式的计算结果与实际台风很相似。

由表 2 可见,由于加热廓线的不同,模式台风中心气柱中各层增温也不同。在分布函数取值大的那个层次增温要高一些。故模式 1 在高层增温比模式 2 要来得大,而后者在低层增温比前者大。但这二个模式在中心气柱内平均增温的效果不同,模式 2 要来得大,因而模式 2 中台风的发展要比模式 1 猛烈。由于这两个模式在任一气柱中放出的热量均

表 2 24 小时模式台风中心的增温值

增温(°C) / 模式 \ 层次	1	2	3	4	5	中心平均	中心平均与 外围平均之差
模式 1	-0.6	13.7	4.3	8.8	12.3	7.7	4.9
模式 2	-1.8	12.2	2.8	12.4	16.1	8.3	5.6

相同,而模式 2 的风速总的说来比模式 1 要来得大,这个事实表明热能向动能转换的效率各层是不相同的,在中低层的转换效率要比高层高,因而中低层的热源更有利于台风的发展。

由表 2 中我们还可见到,虽然在中心有热源作用,以上的二个模式在最高层(100mb 附近,  $k=1$  层)中心是降温而不是增温。故在该层为冷心结构。其主要原因是由于该层在对流层顶附近,  $\left| \frac{\partial H}{\partial t} \right|$  较小。在该层中心附近为上升气流。在热源增温和对流增温的共同作用难以抵消由绝热上升所造成的降温时,该层中心必然要降温,形成冷心。事实上大西洋的飓风和一些发展强盛的太平洋上的台风在 100 mb 附近的高层的确具有冷心结构<sup>[3-5]</sup>,这与我们的数值试验相一致。

## 2. 试验 2

$$\text{取热源为 } Q_{j,k} = 0.32 \cdot \exp(-j^2/25) \cdot F_2(k) \quad (13)$$

此热源水平分布形式与(9)大体相同,只不过热源的垂直梯度没有(9)式那样大,此热源的强度比(9)式强,故模式台风发展得也快些。

为进一步研究热源垂直分布对台风发展的影响,我们取以下 7 种不同的垂直分布函数  $F_2$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{模式 1: } F_2(1)=0, F_2(2)=0.7071, F_2(3)=1, F_2(4)=0.7071, F_2(5)=0; \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{模式 2: } F_2(1)=1, F_2(2)=1, F_2(3)=1, F_2(4)=0.7071, F_2(5)=0; \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{模式 3: } F_2(1)=0.25, F_2(2)=0.5, F_2(3)=1, F_2(4)=0.5, F_2(5)=0.25; \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{模式 4: } F_2(1)=1, F_2(2)=1, F_2(3)=1, F_2(4)=0.5, F_2(5)=0.25; \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{模式 5: } F_2(1)=0, F_2(2)=0.7071, F_2(3)=1, F_2(4)=1, F_2(5)=1; \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{模式 6: } F_2(1)=0.25, F_2(2)=0.5, F_2(3)=1, F_2(4)=1, F_2(5)=1; \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{模式 7: } F_2(k)=1, k=1, 2, 3, 4, 5. \end{array} \right. \quad (20)$$

按中下层热源的分布可把以上 7 种模式分为三组,第一组为模式 1,2;第二组为模式 3,4;第三组为模式 5,6,7。初始场均取方案 3。

由试验中可见,对于不同的  $F_2$  的分布,系统的  $p_{00}$  和  $v_{0\max}$  也各不相同,即系统的发展速度各不相同。但每一组中各模式的  $p_{00}$  和  $v_{0\max}$  随时间的变化曲线都相差不甚远。第三组模式降压最快(热源在底层分布最强),其次为第二组,而第一组(底层无热源)最慢,(见图 4)。 $v_{0\max}$  也是第三组增加最快(图略)。与以上试验 1 类似,中下层的热源有利于系统的发展。

图 5 给出了在 12 小时各模式在距中心 100 公里处切向风速  $v_{\theta}$  的垂直廓线。风速的垂

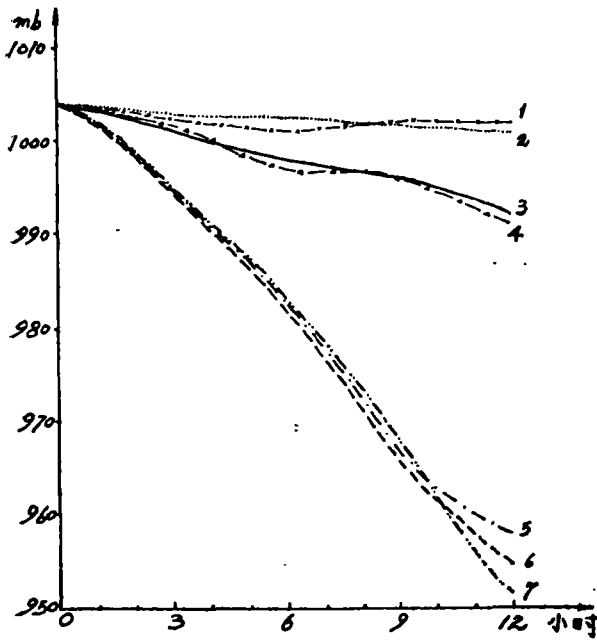


图4 各模式中心地面气压  $p_0$  随时间变化图

直分布一般是一个向上风速递减的气旋(模式 1,2 略不同,在  $k=4$  层气旋性环流最强)。各模式在  $k=1$  层(对流层顶附近)风速相差不大,而在  $k=5$  层(即底层,900mb左右)风速却相差很远,但同一组内风速相近。反之,在  $k=2$  层(300 mb 左右)同一组的风速有较大差异。在中层( $k=3$  层)以上廓线可分为两组,组A为模式 2, 4,7, 组B为模式 1,3,5,6, 每组内各模式在中高层热源的分布相同或相近,它们在中层以上风速的垂直分布廓线也相近。由此可见热源的垂直分布对流场的垂直结构有很大影响。

还可见到所有的模式在  $k=2$  层中心处均有明显的增温, 而  $k=$

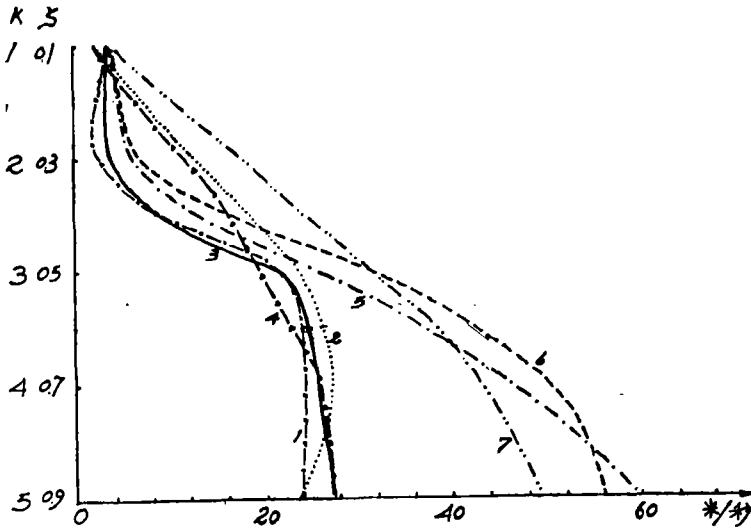


图5 12小时各模式在距中心100公里处的  $v$  垂直分布廓线图

1层在对流层顶附近故中心增温不大或略有降温, 在  $k=2$  层中心处组A的增温比组B略大些(图略)。

由表3可见12小时中心气柱平均气温  $\bar{T}_0$  与外围气柱平均气温  $\bar{T}_{20}$  之差  $\Delta T = \bar{T}_0 - \bar{T}_{20}$  与该时的地面中心气压  $p_0$  成反相关,  $\Delta T$  越大则  $p_0$  降得越低, 一般  $v_{max}$  也大。我们注意到, 模式2与模式5以及模式4与模式6, 在整个气柱内放出的热量相同, 但二者  $\nabla T$  相差很大,  $p_0$  和  $v_{max}$  也相差很大, 这就再次说明了热量在各层上转换成动能的效率不同, 在中

低层效率要高。由此可见,低层热源和高层热源强度发生同样的变化,低层的影响要大得多,这是我们必须注意的。

## 五、讨 论

1. 风场垂直切变对台风影响的结论可归纳如下:

表 3 各模式 12 小时  $\Delta T$  值及  $P_{10}$ ,  $v_{\theta_{max}}$  值

模 式	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta T(^{\circ}C)$	-0.12	0.4	1.7	2.12	8.04	8.54	8.54
$P_{10}(mb)$	1002.0	1000.8	992.2	991.4	958.4	955.1	952.1
$v_{\theta_{max}}(米/秒)$	30.8	28.2	27.8	28.6	59.8	56.0	58.7

1) 台风高层外围的反气旋环流是台风发展的结果。

2) 风场的垂直切变不利于台风的发展。

以上结论是在外加定常热源的情形下得到的,故仅适用于初始的热带扰动(云团)已经生成,而要判断其是否会发展成台风这样的问题上。

W. M. Gray 在分析热带云团中指出“高层通风不同将使 500—200 mb 上焓的积累有很大差异,在无通风的云团中在 200—500 mb 上有很强的焓的积累,表现为增暖,而常见的云团中几乎没有焓的积累,故热带气旋的生成潜力应与 500—200 mb 之间的通风量级呈反相关。而这种通风能用 950—200 mb 间的风速切变来相当精确的描述”<sup>[6]</sup>。以上的数值试验正说明了这个问题。

在初始场无热源,而要通过上升运动引起积云对流释放凝结潜热的情形下,以上结论是否仍正确,即上述结论能否用到云团生成的问题上,则还未经过试验,尚待研究。

2. 由热源垂直分布廓线对台风发展影响的数值试验中可得以下结论:

1) 各层的热源对本层的温度场和流场影响最大,对其它层次影响较小。

2) 中低层的热源对系统的发展影响很大,中低层热源强有利于系统的发展,中低层热源放出的热量转换成动能的效率要比高层高。低层热源对台风的影响十分明显。

3) 流场和温度场的结构取决于热源的垂直分布。

Yamasaki(1968)和 Sundqvist(1970)曾指出,当有一大部分热量在对流层中部释放时,风暴发展就更快<sup>[7]</sup>。我们上面的试验也得到了同样的结论。不过在我们的试验中还可看到,对流层低层的热源对系统的迅速发展也有相当重要的作用。对流凝结在中低层最强,对台风的发展可能具有启动的机制。

在我们的试验中可见,当热源垂直分布取(11)式时,模拟的系统在各方面均与实际的台风接近。此时在高层为暖心,在底层近中心有一条大风带。带上的风速随高度递减。在高层外围为反气旋环流。在试验中还可见到,对低层未加热源的第一组系统的结构,其与热带气旋的结构明显不同,其最大风速带出现在  $k=4$  层(700 mb 左右),在该层之下温



度场为冷心结构。这种结构与太平洋和印度洋(东南亚区域)上某些副热带气旋的结构类似<sup>[8]</sup>。由此我们推测热源垂直结构的不同,是热带气旋与副热带气旋结构不同的原因之一。

致谢: 本文是在科学院大气所曾庆存研究员的指导下完成的。

### 参 考 文 献

- [1] 陈联寿, 丁一汇, 西太平洋台风概论, 103—109, 科学出版社, 1979。
- [2] Zhang Ming (张铭), Zeng Qing-cun (曾庆存), The numerical simulation of typhoon, 第二届亚洲流体力学会议论文集 Science Press, Beijing China 912, 1983.
- [3] Gentry, R. C., Structure of upper troposphere and lower stratosphere in the vicinity of hurricane Isbell 1964, *Papers in met. and Geophysics*, 18 No 4, 298—310, 1967.
- [4] Waco, D. E., Temperatures and turbulence at tropopause levels over hurricane Beulah (1967), *Mon. Wea. Rev.* 98, No. 10, 749—755, 1970.
- [5] Bell, G. J., Tsui Kar-sing, Some typhoon soundings and their comparison with soundings in hurricanes, *Jour App. Meteor*, 12, No 1, 1973.
- [6] Gray, W. M., Tropical cyclone genesis in the Western North Pacific, *Envpershfac Technical Paper*, No 16—75.
- [7] R. A. Anthes 著, 王志烈、丁一汇译, 成熟飓风的动力学和能量学, 63, 科学出版社, 1980。
- [8] 包登澜, 热带天气学, 219—223, 科学出版社, 1980。

## THE NUMERICAL SIMULATION ON THE INFLUENCE OF VELOCITY PROFILE AND HEATING SOURCE PROFILE ON THE DEVELOPMENT OF TYPHOON

Zhang Ming

(Meteorological Institute of Air Force)

### Abstract

In this paper the influence of velocity profile and heating source profile on the initiation and development of typhoon has been tested by using the 5-layer primitive equation model in cylindrical coordinates. Assuming constant heating source, it is found that in upper layer the anticyclone is the result of the development of typhoon. The perpendicular shear of initial wind field is disadvantageous to the development of typhoon.

Development of typhoon is related to perpendicular distribution of the heating source. It is advantageous to the development of typhoon if the heating source in upper layer is stronger than in lower layer.