

# 台风自身动力学过程(CISK)对其移动的影响\*

李 崇 银

(中国科学院大气物理研究所)

钮 学 新

(浙江省气象台)

台风的移动是一个既重要又复杂的气象问题,虽然已经有过许多分析研究,但仍有不少问题没有搞清楚。在台风路径预报中,目前用得较多的方法之一是所谓“引导气流法”,它把台风作为一个“质点”,其移动只受外部流场的引导。不考虑台风自身动力学过程的影响,可能是引导气流法出现台风路径预报误差的重要原因之一。因为实际台风是一种极为活跃的天气系统,不能视其为完全被动的“质点”。除了外界环境(引导气流)对台风的移动有影响外,台风本身的动力学过程和结构也必然对其移动有不可忽视的作用。

根据第二类条件不稳定理论,台风的形成和发展是积云对流和天气尺度低压扰动间正反馈的结果。台风的能量来自对流凝结潜热的释放,台风的移动也会同积云对流活动密切相关。已有的雷达探测和卫星云图分析完全证实了这一点。例如,国外雷达探测的统计分析指出,台风密蔽云区回波一般都出现在台风前进方向附近,尤其集中在前进方向的偏右一侧<sup>[1]</sup>。国内的雷达观测也表明,台风有不断向其前沿辐合对流最强烈的回波区行进的趋向<sup>[2]</sup>,可以把回波密集区作为未来 12 小时的台风移向考虑<sup>[3]</sup>。卫星云图分析表明,台风前方云区长轴方向附近的“亮光”云区似乎有引导台风前进的作用<sup>[4]</sup>。这里的所谓强烈回波区或亮光云区,就是积云对流最旺盛的地区,也可以说是 CISK 强烈发展的地区。因此,已有的观测分析表明,台风的移动是和 CISK 这种台风基本动力学过程有关的。

本文首先从动力学理论上讨论 CISK 的移动性。台风的发展和维持依赖于 CISK 机制,那么,CISK 的移动也必然导致台风的移动。然后,我们用实际资料研究台风自身动力学过程对其移动的影响,并将指出,考虑了这种动力学影响后,可以提高台风路径预报的准确率。

## 1. 动力学过程

台风的基本动力学过程是第二类条件不稳定,而在台风活动地区,对流层的基本风场有着较大的垂直切变,这种基本风场结构必然对第二类条件不稳定产生影响,因此需要研究有垂直切变基本气流的 CISK。为了简单,我们将垂直切变基本气流  $\frac{d\bar{u}}{dp} = c$  (常值) 引入两层板对称 CISK 模式,其控制方程组可以写成<sup>[5]</sup>:

$$\sigma \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \frac{d\bar{u}}{dp} + f \frac{\omega_3}{\Delta p} = 0 \quad (1)$$

$$\sigma \frac{\partial u_3}{\partial y} + \frac{\partial \omega_3}{\partial y} \frac{d\bar{u}}{dp} + f \frac{\omega_4 - \omega_2}{\Delta p} = 0 \quad (2)$$

$$\sigma \frac{u_3 - u_1}{\Delta p} - \frac{\omega_3 - \omega_1}{\Delta p} \frac{d\bar{u}}{dp} - \frac{s_2}{f} \frac{\partial \omega_2}{\partial y} = \frac{R}{c_r f p_2} \frac{\partial}{\partial y} Q_2 \quad (3)$$

\* 本文于 1987 年 2 月 7 日收到, 1987 年 10 月 20 日收到修改稿。本研究工作得到国家气象局台风科研基金的资助。

其中  $\Delta p$  是分层气压间隔;  $\sigma = \sigma_r + i\sigma_l$ ,  $\sigma_r$  是扰动增长率,  $\sigma_l$  是圆频率; 其他符号有通常的气象意义, 但却与  $t$  无关。

积云对流加热简单地取为

$$Q_2 = -\frac{\mu L}{2 \Delta p} (\bar{q}_{s,3} - \bar{q}_{s,1}) \left( \omega_2 + \frac{1}{2} \omega_4 \right) \quad (4)$$

这里  $\mu$  是加热参数,  $L$  是水汽凝结潜热,  $\bar{q}_s$  是饱和比湿。

由(1) — (4) 式不难得到如下方程:

$$\frac{\partial^2 \omega_2}{\partial y^2} + 2 \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{f}{\Delta p s_2} \frac{\partial}{\partial y} (\omega_3 - \omega_1) + \frac{f^2}{\Delta p^2 s_2} (\omega_4 - 2 \omega_2) = \mu H \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \omega_2 + \frac{1}{2} \omega_4 \right) \quad (5)$$

其中

$$s_2 = -\frac{R}{p_2} \left( \frac{\partial \bar{T}_2}{\partial p} - \frac{R \bar{T}_2}{p_2 c_p} \right)$$

是第二层上的静力稳定度参数, 而

$$H = \frac{RL}{2 s_2 p_2 c_p \Delta p} (\bar{q}_{s,3} - \bar{q}_{s,1})$$

在热带地区, 一般有  $H \sim 1.1$ 。

依据台风垂直速度的结构特征, 可以取近似关系  $\omega_3 - \omega_1 = \frac{1}{2} (\omega_4 - \omega_2)$ 。而由连续方程  $\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial \omega}{\partial p}$

可以引入流函数  $\psi = \Psi(y, p, t) e^{\sigma t}$ 。这样, (5) 式可以改写成:

$$\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y^2} + \frac{d\bar{u}}{dp} \frac{f}{\Delta p s_2} \frac{\partial}{\partial y} (\Psi_4 - \Psi_2) + \frac{f^2}{\Delta p^2 s_2} (\Psi_4 - 2 \Psi_2) = \mu H \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \Psi_2 + \frac{1}{2} \Psi_4 \right) \quad (6)$$

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

$$\Psi_4 = \frac{K}{K + \sigma} \Psi_2 \quad (7)$$

其中  $K \sim 1.72 \times 10^{-6} s^{-1}$ , 为边界层摩擦系数。

将(7)式代入方程(6), 再令  $\Psi_2 = A e^{i l y}$ , 可得到两个代数方程, 最后不难得到

$$\sigma_r = \frac{[(3 \mu H - 2) l^2 - \eta] K}{2[(1 - \mu H) l^2 + \eta] + l^2 \varepsilon^2 / [(1 - \mu H) l^2 + \eta]} \quad (8)$$

$$\sigma_{ly} = -\frac{\mu \varepsilon \sigma_r}{(1 - \mu H) l^2 + \eta} \quad (9)$$

其中  $l$  是波数, 而

$$\eta = \frac{2 f^2}{\Delta p^2 s_2}, \quad \varepsilon = \frac{f}{\Delta p s_2} \frac{d\bar{u}}{dp}$$

这样, 由(9)式可以得到 CISK 扰动的移动速度为

$$C_y = -\frac{\sigma_{ly}}{l} = \frac{f \sigma_r}{\Delta p s_2 [(1 - \mu H) l^2 + \eta]} \frac{d\bar{u}}{dp} \quad (10)$$

当考虑  $\frac{d\bar{v}}{dp}$  的影响, 类似地可以有

$$C_x = -\frac{\sigma_{lx}}{k} = \frac{f \sigma_r}{\Delta p s_2 [(1 - \mu H) k^2 + \eta]} \frac{d\bar{v}}{dp} \quad (11)$$

台风可近似视为圆形涡旋,  $l \approx k$ , 增长率  $\sigma_r$  应为同一个数值(本文可以得到  $\sigma_{ry}, \sigma_{rx}$ , 但它们是大致相等的, 因为  $l \approx k$ , 而  $\varepsilon$  对  $\sigma_r$  影响很小)。

根据(10)和(11)式我们可以看到, 有垂直切变基本气流作用的 CISK 动力学过程, 将使台风具有自身动力学移动特性。雷达观测指出台风有不断向其前沿最强回波区行进的趋势, 而最强回波区正是对流

活动最强的地区,也是 CISK 强烈发展的地区。上面我们已经得到了“CISK 扰动”的移动特征,可以作为观测现象的动力学解释。

如果把在引导气流作用下台风的移动称为运动学移动的话,在 CISK 过程作用下台风的移动应称为动力学移动。这样,台风的移动不仅有运动学速度,还有动力学速度,台风的路径预报需要考虑台风自身动力学过程的影响。

## 2. 实例计算结果

为了搞清上述动力过程对台风移动的影响程度,我们选取了近海地区资料比较完整的 17 个台风进行了实例计算。17 个台风的编号分别是 7203, 7303, 7413, 7615, 7708, 7806, 7810, 7909, 7910, 8114, 8406 和 8409 等。在用(10)和(11)式计算  $C_x$  和  $C_y$  时,取对流加热参数  $\mu=0.865$ ,水平计算格距取 450 km,  $k=l=6.2832 \times 10^{-8} \text{m}^{-1}$ 。其他数值均取实测资料,基本风场用 850 hPa, 500 hPa 和 150 hPa 的资料。

为便于比较,我们也同时计算了上述台风一例的引导气流。关于地转引导气流的计算问题,董克勤等有过不少工作<sup>[9]</sup>,认为 500 hPa 和 850 hPa 二层引导气流合成较好。本文分别计算了三种引导气流,即 500 hPa 一层引导,500 hPa 和 850 hPa 二层引导,150, 500 和 850 hPa 三层引导。在具体计算引导气流时,为了使资料的代表性更好,用台风个侧的三个格点的平均高度值代表台风该侧的位势高度,以求其地转风速  $V_{gx}$  和  $V_{gy}$ 。

表 1 给出了对 17 个台风例子所作计算的平均结果。其中  $\bar{u}_0$  和  $\bar{v}_0$  分别为台风的 24 小时实际移动速度分量; $\Delta\bar{u}_g$  和  $\Delta\bar{v}_g$  分别是地转引导气流与台风实际移速的平均偏差; $\bar{C}_x$  和  $\bar{C}_y$  是由(10)和(11)式计算的台风平均动力学移速; $\Delta\bar{u}$  和  $\Delta\bar{v}$  分别是计算的台风移速(引导气流和动力学移速之和)与台风实际移速之间的平均偏差。

表 1 计算的移速与实际台风移速的比较

$\bar{u}_0$	$\bar{v}_0$	$\bar{C}_x$	$\bar{C}_y$	$\Delta\bar{u}_g$	$\Delta\bar{u}$	$\Delta\bar{v}_g$	$\Delta\bar{v}$	引导层
9.9 (km/h)	10.8	-1.04	2.99	9.41	9.04	5.92	5.84	500 hPa
				8.83	8.13	7.10	5.74	850, 500 hPa
				20.64	19.69	14.41	12.19	150, 500, 850 hPa

从表 1 所给数值可以看到:

(1) 用地转引导气流预报台风移动有不小的误差,相对来讲,用 500 和 850 hPa 二层平均引导较好,这同董克勤的结论相符。

(2) 台风的 CISK 动力学过程产生的动力学移速平均可达到 3 km/h,接近台风实际移速的 1/3。当用引导气流法又同时考虑台风动力学移速后,台风移动预报的效果有明显改善。

上述台风移动的计算时刻大多数处于移向转折过程,有的是难于预报的疑难台风路径。对 7203, 7303, 7708, 7806, 7810 和 7909 号台风的 10 次难报路径时次另行统计,其结果表明,对于这些疑难路径,考虑台风动力学移动后,预报效果有更大的改进。

台风自身动力学过程基本上是引起台风路径向偏北方向折转,因此考虑台风的动力学移速后,对于路径向北折转的台风其预报效果更佳。表 2 列出了 7413, 7615, 7810, 7909 和 7910 号台风向北折转时的计算结果。可以看到动力学移速分量已达到 5—6 km/h,充分表明了台风动力学过程对台风移动的重要影响。

为了更清楚地说明台风 CISK 动力学过程对台风移动的影响,图 1 a-c 分别给出了 7615, 7806 和

表 2 个例计算结果

台风编号	计算时刻	$C_x$	$C_y$	$\Delta u_x$	$\Delta u$	$\Delta v_x$	$\Delta v$
7413	1974.8.18.20 h	-0.22	1.75	-17.61	-17.83	-4.59	-2.84
7615	1976.8.20.20 h	-1.18	6.12	7.72	6.54	-6.85	-0.74
7810	1978.8.16.20 h	-1.44	2.18	3.74	2.31	-3.29	-1.10
7909	1979.8.15.20 h	-0.79	5.10	2.84	2.05	-10.62	-5.53
7910	1979.8.23.20 h	-1.18	3.06	-8.85	-7.67	-5.50	-2.45

7303 号台风的实况路径和计算的 24 小时预报结果。图中实线是实况路径；点线是用引导气流法得到的预报路径；虚线为引导气流和台风动力学移速共同决定的台风预报路径。曲线上的圆圈表示计算时的台风位置，“×”号表示 24 小时后的台风位置。图 1 a 所示的 7615 号台风可以作为台风典型路径的代表，但引导气流法也没能给出好的预报结果，考虑了动力学移速后，预报的台风位置同实况却相当接近。图 1 b 和图 1 c 给出的 7806 和 7303 号台风分别为两个不同类型的疑难路径的代表。7806 号台风 7 月

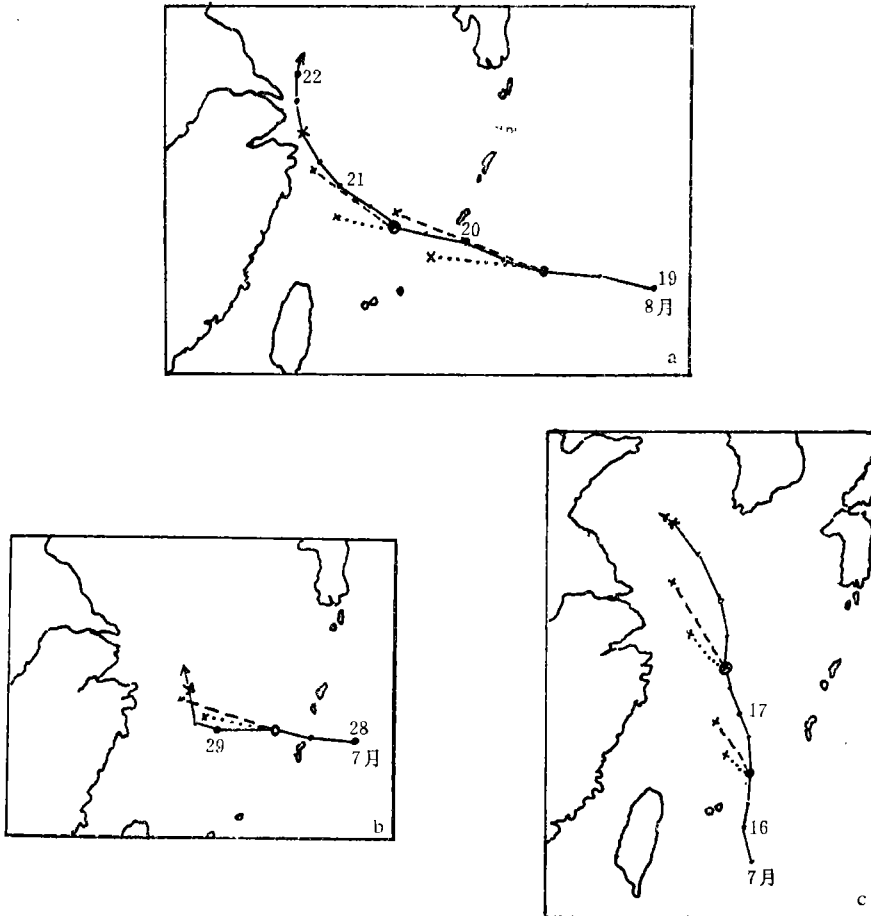


图 1 三个台风实例

(a 7615 号台风, b 7806 号台风, c 7303 号台风)

29 日在浙江省以东洋面有一个急速的北折, 考虑了动力学移速之后, 虽然细节未能报出, 但 24 小时预报的台风位置却同实况甚为接近。7303 号台风在 7 月 16 日之后两天内连续一直向北移动, 成为疑难台风的典型个例。若用引导气流法进行预报, 台风预报位置比实况偏西南许多 (用其他方法预报这个台风, 结果也相当不好)。考虑了 CISK 动力学移速后, 预报的台风位置同实况接近了许多。

### 3. 结 语

台风的形成、发展和维持都依赖于 CISK 机制。在台风活动区域, 基本气流又存在着明显的垂直切变, 在这种垂直切变基本气流作用下, CISK 具有移动性。因此 CISK 也就自然地影响台风的移动, 成为台风动力学移动的机制。

从 17 个台风实例的计算表明, 台风的动力学移速接近台风平均移速的  $1/3$ , 有时甚至更大, 因此在研究和预报台风路径时必须考虑这种动力学移动。

对于西北太平洋地区夏季的基本风场结构, 在基本气流垂直切变的作用下, 台风的 CISK 动力学移动一般都向西北方向, 这也可能是台风一般都向西北方向移动的原因之一。

本文同时考虑台风的运动学移动和动力学移动后, 计算得到的台风预报位置和实况比较接近。特别在一些疑难台风路径的预报上, 考虑台风动力学移速更显得突出和有利。

最后需要指出, 由于理论模型比较简单, 一些参数只能用一般平均值, 加之高空风资料只能每 12 小时一次, 这些对计算结果都有一定影响。因此, 在实际工作中进一步更好考虑和计算动力学移速, 可望对台风路径预报有更大帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Sen, H.V., Radar hurricane precipitation patterns as track indicators, Twelfth Conference on Radar Meteorology, 1964.
- [2] 福建省气象局 652 站, 雷达探测在台风短期预报中的初步应用, 台风会议文集, 81-88, 上海人民出版社, 1972。
- [3] 广东省汕头雷达站, 应用雷达回波资料预报台风路径, 台风会议文集, 249-259, 上海人民出版社, 1974。
- [4] 李玉兰等, 卫星云图上云系与台风路径的关系, 夏季西太平洋热带天气系统的研究, 29-35, 科学出版社, 1974。
- [5] 李崇银, 垂直风切变中的 CISK, 大气科学, 7, 4, 427-431, 1983。
- [6] 董克勤等, 台风路径与各等压面上基本气流的关系, 气象学报, 35, 2, 132-137, 1965。

## THE EFFECT OF THE TYPHOON DYNAMICS PROCESS (CISK) TO ITS MOVING

Li Chongyin

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Niu Xuexin

(Meteorological Bureau, Zhejiang Province)

### Abstract

The influence of the typhoon dynamics process (CISK) on typhoon moving has been studied based on theoretic research and practical computations in this paper. The results indicate that the CISK perturbation usually has dynamics moving velocity northwestward over Northwestern Pacific. Practical computations show that the typhoon dynamics moving velocity can approach  $1/3$  of the mean moving velocity of typhoons and it may be more sometimes. Therefore, the forecasting accuracy will be obviously improved to good if the dynamics moving velocity of typhoon indicated in this paper is considered. Particularly, the typhoon dynamics moving velocity is more important to forecast the difficult and complicated track of typhoon.