

非线性水平动量平流作用对 热带气旋运动的影响*

杨平章 贺海晏

(中山大学大气科学系, 广州 510275)

摘 要 本文将热带气旋视为与环境间有动量交换的系统,着重分析了非线性水平动量平流作用对热带气旋运动的影响,从理论上解释了一些热带气旋路径异常变化的原因.

关键词 热带气旋,非线性水平动量平流作用,天气系统

分类号 P433,P444

热带气旋(TROPICAL CYCLONE),以下简称 TC,是一个边旋转、边移动的环流系统.由于 TC 独特的动力性质,可以用 TC 中心的移动表示整个系统的移动. TC 中心的移动轨迹(即 TC 路径)的预报是热带气旋业务预报中最关键的问题.目前对 TC 路径预报尤其是对于 TC 路径的异常变化的预报能力较低.对 TC 异常路径的分析^[1]表明,TC 系统与其环境的天气尺度系统的相互作用是引起 TC 路径异常变化的重要原因,本文应用动力学原理分析了这种相互作用的重要表现形式,即非线性动量平流引起的水平动量辐合或辐散对 TC 路径异常变化的影响.

1 TC 系统的理论模型

根据卫星、雷达、飞机探测和观测分析研究^[2,3]表明,TC 系统的结构,在垂直方向可分为低层流入层、高空流出层和中间深厚的气旋式旋转的稳定层;在水平方向可分为眼区、内区和外区.驱动 TC 环流的主要能源是下边界层向上输送,低层辐合流入的暖湿空气通过积云对流释放的潜热能,积云群的分布常呈螺旋云带分布,在眼壁附近是积云对流最强烈的地方.根据 TC 系统的这种独特结构和动力特征,本文中将图 1 所示的 TC 系统的模型,作为理论分析的模型.图 1 为通过 TC 中心的径向剖面示意图, R_0 为眼的半径, r_0 为 TC 系统的水平尺度, z_B 为边界层顶高度, h 为地形高度函数, z_T 为 TC 系统伸展高度,箭头所示为 TC 环流在剖面上的投影.把 $R_0 \leq r \leq r_0, z_B \leq z \leq z_T$ 所限的区域 τ 作为一个与区域外有

收稿日期:1993-11-22

* 国家“八五”攻关资助项目

质量、水汽和动量交换的力学系统,系统的边界条件为:

眼壁径向速度

$$V_r|_{r=R_0} = 0 \quad (1)$$

上边界条件

$$W|_{z=z_T} = 0 \quad (2)$$

下边界条件

$$W|_{z=z_b} = W_b + W_a \quad (3)$$

$W_b = \frac{dH_b}{dt}$ 为边界层厚度 (H_b) 变化引起的垂直运动, $W_a = \frac{dh}{dt}$ 为地形强迫引起的垂直运动.

系统的下边界和外侧边界为开放边界,系统与环境的质量、水汽和动量交换主要表现为下边界向上输送、低层辐合流入暖湿空气,高空辐散流出干冷空气.

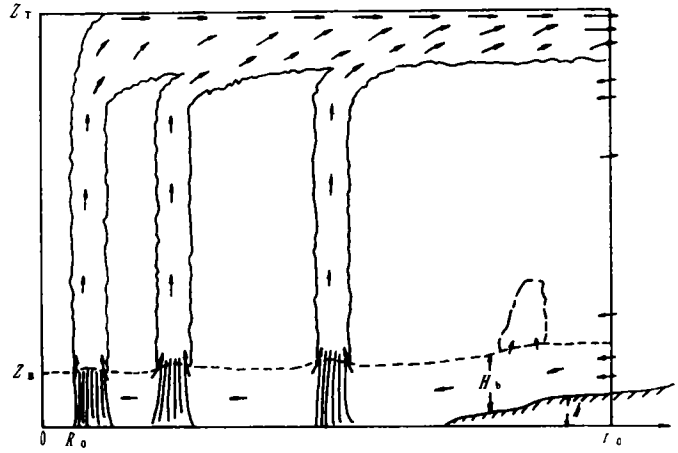


图 1 热带气旋的径向剖面图
 Fig. 1 Radial cross section for a tropical cyclone

2 TC 系统的运动方程

垂直方向取静力近似的描述空气微团运动的 z 坐标系方程组可写为:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} + \rho W \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = -\nabla P - \rho g \hat{k} - f \hat{k} \times \rho \vec{v} - i \vec{f} \rho W + \rho \vec{F} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$p = \rho RT \quad (6)$$

$$C_p \left(\frac{dT}{dt} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = Q \quad (7)$$

$$\frac{dq}{dt} + W \frac{\partial q}{\partial z} = S \quad (8)$$

如果热源 Q , 摩擦力 \vec{F} 和水汽源 S 已知或能表达为 $\vec{v}, W, \rho, p, T, q$ 的函数, 则 (4) ~ (8) 式构成的方程组是封闭的, 它包含 7 个方程, 其中运动方程 (4) 式是矢量形式, 可写为 3 个标量方程, 7 个未知函数, 即水平风速 \vec{v} (有 2 个分量 u, v), 垂直风速 W , 密度 ρ , 气压 p , 气温 T 和比湿 q . 方程组中的个别微商为水平个别微商, 即

$$\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \quad (9)$$

∇ 为 Hamilton 算子, 即

$$\nabla \equiv i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (10)$$

i, j, k 为 z 坐标系的 3 个单位矢, i 向东, j 向北, k 铅直向上. 给定初边值条件求解方程组 (4) ~ (8) 便可完全了解 TC 系统运动的内部环流和状态的空间分布及其随时间的演变过程. 本文的目的不是着眼于 TC 系统内每个空气微团的运动和状态变化, 而是着眼于图

1 所示的整个 TC 系统的运动,即 TC 中心的移动.

取 TC 系统中心为只随 TC 系统平移而不旋转的移动坐标系的原点,移动坐标系的 2 个相互正交的水平坐标轴与固定在地面上的 z 坐标系的水平坐标轴始终保持平行. 设 TC 中心的移动速度为 \vec{v}_o , 相对于移动坐标的水平风速为 \vec{v}_R , 则有

$$\vec{v} = \vec{v}_o + \vec{v}_R \quad (11)$$

根据只作平移而无旋转的移动坐标与固定坐标的加速度合成定理:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}_o}{dt} + \frac{d\vec{v}_R}{dt} \quad (12)$$

(12) 式中的牵连加速度 $\frac{d\vec{v}_o}{dt}$, 即为 TC 系统的移动加速度, 相对加速度为:

$$\frac{d\vec{v}_R}{dt} = \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + (\vec{v}_R \cdot \nabla) \vec{v}_R \quad (13)$$

其中 $\frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t}$ 为相对于 TC 系统位置保持不变的某点相对速度 \vec{v}_R 的局地变化率, 它与固定坐标系的局地变化的关系为

$$\frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} = \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + (\vec{v}_o \cdot \nabla) \vec{v}_R \quad (14)$$

(14) 式代入(13)式, 则有

$$\frac{d\vec{v}_R}{dt} = \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + [(\vec{v}_o + \vec{v}_R) \cdot \nabla] \vec{v}_R = \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}_R \quad (15)$$

由于 $\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}_o = 0$, 所以(15)式可改写为

$$\frac{d\vec{v}_R}{dt} = \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}_R \quad (16)$$

(16) 式代入(12)式, 则有

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}_o}{dt} + \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}_R \quad (17)$$

(17) 式代入(4)式, 并在 Coriolis 力中的 \vec{v} 用(11)式代入, 则有

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\vec{v}_o}{dt} + \rho \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + (\rho \vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}_R + \rho W \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \\ = -\nabla p - \rho g \vec{k} - f \vec{k} \times \rho \vec{v}_o - f \vec{k} \times \rho \vec{v}_R - i \vec{f} \rho W + \rho \vec{F} \end{aligned} \quad (18)$$

连续方程(5)乘 \vec{v} 后与(18)式相加, 则有

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\vec{v}_o}{dt} + \rho \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \left(\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} \right) + \rho W \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial z} \\ = \nabla p - \rho g \vec{k} - f \vec{k} \times \rho \vec{v}_o - f \vec{k} \times \rho \vec{v}_R - i \vec{f} \rho W + \rho \vec{F} \end{aligned} \quad (19)$$

其中含质量散度的项与速度平流项可合并简写为

$$\begin{aligned} \vec{v} \left(\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} \right) + \rho u \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \\ = \frac{\partial \rho u \vec{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \vec{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho W \vec{v}}{\partial z} \end{aligned} \quad (20)$$

(5), (20) 式代入(19)式, 则有

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\vec{v}_o}{dt} + \rho \frac{\partial \vec{v}_R}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho u \vec{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \vec{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho W \vec{v}}{\partial z} \right) \\ = -\nabla p - \rho g \vec{k} - \rho \vec{k} \times \rho \vec{v}_o - f \vec{k} \times \rho \vec{v}_R - i \vec{f} \rho W + \rho \vec{F} \end{aligned} \quad (21)$$

定义体积平均符号为 $\bar{\varphi}$, 面积平均符号为 $\bar{\varphi}^\sigma$:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\tau} \iiint_V \varphi d\tau \quad (22)$$

$$\bar{\varphi}^\sigma = \frac{1}{\sigma} \iint_\sigma \varphi d\sigma \quad (23)$$

φ 为某一物理量,可以是标量或矢量.

对(21)式各项按(22)式意义取 TC 系统体积 τ 的平均,则有

$$\begin{aligned} & \rho \frac{d\vec{V}_o}{dt} + \rho \frac{\partial V_R}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{S}{\tau} \overline{(\rho V_r \vec{V})}_{r_o}^s - \frac{\sigma_n}{\tau} \overline{(\rho W \vec{V})}_{z_b}^{\sigma_b} \\ & = -\nabla_p \bar{p} - f_o \hat{k} \times \bar{\rho} \vec{V}_o + \bar{\rho} \vec{I} + \bar{\rho} \vec{F} \end{aligned} \quad (24)$$

(24)式左边第四、五项是应用体积分与面积分关系式和 TC 系统的边界条件(1),(2)式对(21)式左边第四项求体积平均的结果,即

$$\frac{1}{\tau} \iiint_V \left(\frac{\partial \rho u \vec{V}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \vec{V}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \vec{V}}{\partial z} \right) d\tau = \frac{S}{\tau} \overline{(\rho V_r \vec{V})}_{r_o}^s - \frac{\sigma_n}{\tau} \overline{(\rho W \vec{V})}_{z_b}^{\sigma_b}$$

而 $(-\nabla_p \bar{p} - f_o \hat{k} \times \bar{\rho} \vec{V}_o + \bar{\rho} \vec{I})$ 是(21)式右边前五项的体积平均,即

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tau} \iiint_V \left(-\nabla p - \rho g \hat{k} - f_o \hat{k} \times \rho \vec{V}_o - f_o \hat{k} \times \rho \vec{V}_R - \vec{i} \vec{f} \rho W \right) d\tau \\ & = -\nabla_p \bar{p} - f_o \hat{k} \times \bar{\rho} \vec{V}_o + \bar{\rho} \vec{I} \end{aligned} \quad (25)$$

在导出(25)式的过程中一些近似处理类同文献^[1],结果完全一样.

(24)式等式两边乘 $\bar{\rho}^{-1}$,并移项改写为:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{V}_o}{dt} & = -\frac{1}{\rho} \nabla_p \bar{p} - f_o \hat{k} \times \vec{V}_o + \vec{I} + \frac{1}{\rho} \overline{\rho \vec{F}} \\ & - \frac{S}{M} \overline{(\rho V_r \vec{V})}_{r_o}^s + \frac{\sigma_n}{M} \overline{(\rho w \vec{V})}_{z_b}^{\sigma_b} - \frac{1}{\rho} \overline{\left(\rho \frac{\partial \vec{V}_R}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)} \end{aligned} \quad (26)$$

由(26)式可见 TC 系统是个非线性耗散系统,分析^[1]表明正常 TC 路径基本上是在平均气压梯度力,Coriolis 力和内力准平衡下的运动路径.由(26)式可见使 TC 路径发生异常变化的主要原因是非线性耗散作用,即右边第四项的摩擦耗散作用,第五项的非线性水平动量平流引起的水平动量辐合(辐散)作用,第六项的下边界层和地形作用,第七项较为复杂,必须联系方程(6),(7),(8)作分析,因为动力,热力和下边界情况都有可能引起系统的平均相对动量和平均密度的变化.由于非线性问题比较复杂,限于篇幅,本文重点分析非线性水平动量平流作用对 TC 系统运动的影响,但不考虑系统与环境间湍流混合引起的动量交换.

3 非线性水平动量平流作用对 TC 系统运动的影响

用下标 A 表示非线性水平动量平流作用使 TC 系统获得的加速度 $(\frac{d\vec{V}_o}{dt})_A$,即

$$\left(\frac{d\vec{V}_o}{dt} \right)_A = -\frac{S}{M} \overline{(\rho V_r \vec{V})}_{r_o}^s \quad (27)$$

$(\rho V_r \vec{V})_{r_o}$ 表示单位时间通过 TC 系统外侧边界($r = r_o$)单位面积的动量通量,而

$$-S \overline{(\rho V_r \vec{V})}_{r_o}^s = -\iint_S \rho V_r \vec{V} ds \quad (28)$$

表示通过 TC 系统外侧边界的动量矢量和.所以(27)式表示当有动量辐合($V_r < 0$)时系统

获得与辐合动量同方向的加速度,当有动量辐散时($V_r > 0$)系统获得与辐散动量相反方向的加速度.动量是矢量,对于轴对称流场 TC 系统低层有质量辐合,高层有质量辐散,但无论低层或高层都没有净动量的辐合或辐散.实际的 TC 系统流场都是非轴对称的,特别是高空流出层的流出流型是很不对称的,应用(27)式作定量计算,目前业务上资料不足还难以做到,但是可以利用卫星云图,雷达回波的分布型式结合流场定性判别低层辐合动量的方向和高空辐散动量的方向,资料较多的情况下也可定性判别高空辐散动量与低层辐合动量的相对大小,然后定性地判别高空辐散动量与低层辐合动量的矢量和,并应用(27)式诊断非线性水平动量平流作用对 TC 系统运动的影响.下面应用(27)式分析一些常见的 TC 路径的异常变化.

3.1 低层引导作用

正常情况按引导原理,即(26)式中只保留右边第一、二项忽略所有其它项,则有

$$-\frac{1}{\rho} \nabla_{\mathbf{k}} \bar{p} - f_0 \mathbf{k} \times \bar{\mathbf{v}}_0 \approx 0$$

$$\text{或改写为} \quad \bar{\mathbf{v}}_0 \approx -\frac{1}{f_0 \rho} \nabla_{\mathbf{k}} \bar{p} \times \mathbf{k} = \bar{\mathbf{v}}_g \quad (29)$$

即 TC 近似地沿平均地转引导气流运动,而 500 hPa 地转风与 $\bar{\mathbf{v}}_g$ 偏差较小,因此在一般情况下不计算各层体积平均的地转引导气流 $\bar{\mathbf{v}}_g$,而是用中层 500 hPa 地转风代表 $\bar{\mathbf{v}}_g$,这叫中层引导,因此在一般情况下中层 500 hPa 地转引导气流对 TC 系统的运动应起决定性作用.但是陈联寿,丁一汇^[1]对 1970 ~ 1974 年 10 月 ~ 12 月 31 个西行的 TC 分析其移行路径与中低层引导气流的关系,发现有近半数(14 个,占总数 42%)中低层引导气流不一致,其中 13 个受低层引导,只有 1 个受中层引导,这与一般认为中层 500 hPa 地转引导气流对 TC 系统的运动应起决定作用的理论和经验不一致,文[1]给出典型实例,按引导原理看文[1]图中的 500 hPa 流场判断 7427 号台风将转向北上,但实际情况是按 850 hPa 偏东引导气流西行.为什么 10 月 ~ 12 月秋冬季节会出现中低层引导气流不一致,在不一致的情况下又为什么低层引导起决定作用?可以应用(27)式非线性水平动量平流作用来解释这种低层引导现象.假设 TC 前期沿西北偏西路径移动到副热带高压西侧时遇到冷空气南下,这时在低层 TC 系统的北侧气压梯度增大,形成强劲的偏东气流(而中层 TC 系统的北侧是偏西风),同时也使 TC 系统形成北侧偏东风明显大于南侧偏西风的不对称流型,这种不对称流型使 TC 系统获得指向偏西方向的辐合动量,在图 2 的自然坐标中这种辐合动量使 TC 系统获得的加速度分量形式为:

$$\left(\frac{dV_0}{dt}\right)_A = \left[\frac{S}{M} (\rho |V_r| |\bar{\mathbf{v}}_0^s)_r^s\right]_A \quad (30)$$

$$(K_r)_A = V_0^{-2} \left[\frac{S}{M} (\rho |V_r| |\bar{\mathbf{v}}_0^s)_r^s\right]_A \quad (31)$$

由图 2 可见切向分量 $\left(\frac{dV_0}{dt}\right)_A > 0$, TC 路径曲率 $(K_r)_A > 0$,这表示 TC 系统南北不对称流型中北侧强劲的偏东气流的非线性水平动量平流作用使 TC 移速加快,移向左偏沿低层引导气流西行.这种非线性作用与南下冷空气的路径有关,如果冷空气偏西路径南下,TC 系统西北侧在低层卷入强西北风,若 TC 前期路径与图 2 所示类似,则可判断非线性作用将使

TC 系统移速减慢,移向仍然左偏.在统计样本中,中低层引导气流不一致的 14 个西行 TC 中唯一一个低层引导不起作用的 7014 号台风,其原因是南支急流的屏障作用阻挡了冷空气南下,使 7014 号台风不受低层引导(850hPa 引导气流为偏南风)仍受中层 500 hPa 副热带高压南侧偏东气流引导西行.

因此,在秋冬季节当 TC 与南下的冷空气相遇时,TC 系统北侧气压梯度加大,北侧风速大于南侧风速使 TC 系统获得指向偏南的辐合动量,非线性水平动量平流作用使 TC 系统路径左偏沿低层引导气流移动,这就是低层引导作用的原因.

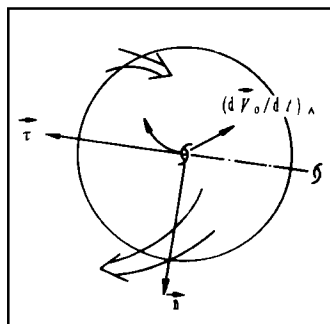
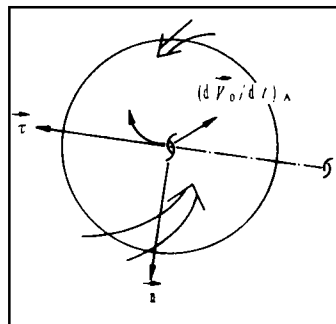
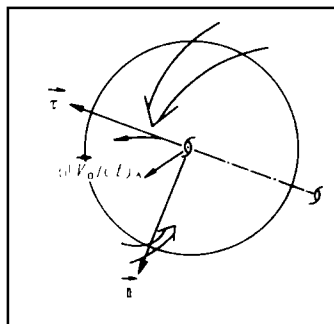


图 2 低层强偏东气流影响 TC 的系统运动

图 3 南海热带气旋路径的右折北翘

图 4 高空单通道流出影响热带气旋的路径

Fig. 2 The effect of strong Ely wind at lower level

Fig. 3 Turning right of TC track over the south China Sea

Fig. 4 The effect of single channel outflow pattern at upper lever

3.2 南海热带气旋北翘路径

当南海 TC 在西行过程中,若在低层,TC 系统在南侧卷入强劲的偏南风,例如在盛夏季节的季风汇合线或印缅槽前的偏南大风,如图 3 所示,TC 系统将获得指向偏北方向的辐合动量,在图 3 的自然坐标中用(30)式判断 $(\frac{dV_0}{dt}) < 0$, (31)式表明 $(K_T)_A < 0$,即偏西移动的 TC 路径将减速右折北翘.在南海中部,特别是北部西行的 TC 系统若遇到上述情况将很快登陆华南,由于路径的突然转折往往使预报失误.密切注意,仔细分析低层 TC 系统流场的非对称性,特别是南部和北部的差异,有助于判断西行的 TC 路径是否右折北翘,及早判断登陆地段

在南海南部夏季经常出现西南风季风潮和高空南支东风急流,反映在平均图^[4]上,夏季南海南部低层有一支西南风急流,高空为偏东风急流,对高低空急流引起的非线性水平动量平流作用,用(27)式判断都是使从太平洋低纬西行进入南海的 TC 路径右折北翘.据包澄澜等(1987)^[5]统计:1974~1983 年 6~10 月在 22°N 以南的低纬地区出现突然东折,北翘等异常路径的 TC 就有 29 个,在上述气候流场背景下,类似图 3 的分析,非线性水

平动量平流作用也是形成这类 TC 异常路径的重要原因.

3.3 高空流出通道对热带气旋运动的影响

TC 系统高空流出层的基本特征是^[6]:反气旋式,高度非对称,大尺度辐散,并经常集中在一条或两条流出通道上.所谓流出通道是指流出集中在一条或两条最大流出区.TC 系统的流出层比较浅薄,一般在 300 ~ 100hPa 间,陈联寿和 GRAY(1984)^[7]研究表明:北半球的 TC 向赤道侧流出的通道远比向极侧流出通道频繁(图略).其中单通道非对称流出流型不仅影响 TC 系统强度,由于有非线性水平动量辐散,对 TC 系统的移动也会有影响.北半球西太平洋低纬 TC 西行至高空东风急流区时经常出现向赤道侧的单通道流出流型,这种典型流型影响 TC 系统运动的示意图如图 4 所示.TC 系统在高空流出层 $V_r > 0$,非线性水平动量平流作用在自然坐标中的分量形式为

$$\left(\frac{dV_\theta}{dt}\right)_A = - \left[\frac{S}{M} \overline{(\rho V_r \vec{V})}_{r_0}^s \right]_A, \quad (32)$$

$$(K_r)_A = - V_\theta^{-2} \left[\frac{S}{M} \overline{(\rho V_r \vec{V})}_{r_0}^s \right]_A, \quad (33)$$

由图 4 可见 $\left(\frac{dV_\theta}{dt}\right)_A < 0$, $(K_r)_A < 0$,这表示:高空流出流型将使 TC 系统移速减慢,移向右偏北翘,夏季高空 200 hPa 在东亚存在二支东风急流^[4],上述的情况是南支东风急流.北支东风急流位于 20°N ~ 25°N 从印度半岛,华南到台湾以东洋面一线,当 TC 移行至台湾以东洋面遇上北支东风急流时,该区低层又是东南季风与西南季风的汇合处,高低空流场与 TC 环流迭加形成的不对称流型,类似于图 4 的分析,非线性水平动量平流作用有利于 TC 右偏转向北上,这与夏季台湾以东洋面是 TC 转向点高频区的现象一致.

高空不对称流出流场与 TC 系统移动间的关系从著名热带气象学家 RIEHL 乘探测飞机穿越飓风眼(即 TC 中心)所看到的情景与上述分析也很一致.RIEHL 描述 1969 年 9 月飞入飓风 DONNA 眼区上空时的情景^[8]:“在飓风 DONNA 中 300 和 200 hPa 高度上飞行时,机载雷达显示飞机周围有一个美丽而非常清楚的环.人们能够看到眼的下部有 2 条分别向内卷的螺旋带.往较高处,眼很清楚,人们可以看到南侧和北侧有很大差异.南半圆充满着在阳光下呈乳白色外貌的密实卷云,顶部在 250 hPa 上,从上往下看,云层完全平坦并无波动起伏.DONNA 眼的北侧,也即移动方向的右侧,在飞行于 200 hPa 上的飞机上空耸立着一座轮廓分明的巨大冰山,呈现一派迷人景色.看上去,它随着高度略为向后倾,也即向外倾斜.”从 RIEHL 的描述表明低层流入层有二条对称的螺旋带意味着低层无净动量辐合,高空流出层是不对称的单通道流出,流出通道在北侧,高空有动量辐散,辐散动量向东与飓风 DONNA 当时向西移动方向相反,按(27)式判断非线性水平动量加速度方向向西,使 DONNA 保持向西移动.另外 RIEHL 的飞行探测也为 TC 模型提供了肉眼观察依据.

4 小结与讨论

本文以现代观测研究为依据,将 TC 视为一个与环境有质量、水汽和动量交换的力学系统,应用动力学原理着重分析了非线性水平动量平流作用对 TC 运动的影响,初步定性分析得到如下结论:

(1) 在秋冬季节当 TC 与南下的冷空气相遇时,TC 系统北侧气压梯度增大,形成南北不对称的低层流入流型,非线性水平动量平流使 TC 系统获得指向偏西南方向的加速度,从而使 TC 系统偏向低层引导气流运动。

(2) 在夏季南海的偏南大风造成 TC 系统南侧风大于北侧风的低层南北不对称流型,非线性水平动量平流会使西行 TC 系统右折北翘,特别是南海南部的西南低空急流和高空南支东风急流的非线性平流作用方向一致,常使从较低纬度进入南海的路径东折,北翘。

(3) 夏季低纬高空二支东风急流对 TC 路径都有影响,非线性平流作用都使 TC 路径右折,北支东风急流有利于台湾以东洋面上的 TC 系统右折北上转向,这与台湾以东附近洋面在夏季是 TC 路径转向点高频区的现象一致。

参 考 文 献

- 1 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京:科学出版社,1979. 262 ~ 324, 207 ~ 217, 258 ~ 261
- 2 Anthes R A. The dynamics and energetics of nature tropical cyclones. *Rev Geophys Space Phys*, 1974, 12: 495 ~ 522
- 3 Anthes R A. 热带气旋的发展、结构和影响(李毓芳等译). 北京:气象出版社,1987. 14 ~ 112
- 4 喻世华,陆胜元. 热带天气学概论. 北京:气象出版社,1986. 25 ~ 45
- 5 包澄澜,徐海明,许亮. 低纬台风东折、北翘路径的探讨. 台风会议文集(1985),北京:气象出版社,1987. 107 ~ 115
- 6 金汉良. 台风高空流出层结构. 台风会议文集(1985),北京:气象出版社,1987. 47 ~ 54
- 7 Chen L, Gray W M. Global view of the upper level outflow patterns associated with tropical cyclone intensity changes during FGGE. *Postprints 15th Conf on Hurricanes and Tropical Meteorology*, *Ame Meteor Soc*, Jan 9 ~ 13, 1984, Miami Fl, 224 ~ 231
- 8 Riehl H. 热带天气与气候(徐德林等译). 北京:气象出版社,1986. 410 ~ 411

The Effect of Non — linear Horizontal Momentum Advection on Tropical Cyclone Motion

Yang Pingzhang * He Haiyan

Abstract The tropical cyclone motion is seriously affected by its environmental synoptic system, A tropical cyclone is considered as a system that continuously exchanges its momentum with its environment. The effect of nonlinear horizontal momentum advection on tropical cyclone motion is mainly analysed in this paper. The reason of abnormal changes of some tropical cyclone tracks is theoretically interpreted.

Keywords tropical cyclone, non-linear horizontal momentum advective effect, synoptic system

* Department of Atmospheric Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275