

高层冷涡对台风路径影响的数值 模拟和动力分析

费 亮 李小凡*
(上海台风研究所, 上海, 200030)

提 要

通过六层斜压干模式模拟了高层冷涡对台风运动的影响,并用涡度方程各动力项的诊断分析,证实了高层冷涡对台风运动的影响主要是通过改变台风中心周围的环流结构而达到的。分析还指出了总涡度倾向和台风运动的直接联系以及这种联系的持续稳定性。同时也发现总涡度倾向主要来自于涡度水平平流和散度场的贡献。说明台风运动主要由正压性动力因子控制。

一、引 言

较长时间来,高层冷涡对台风移动的影响一直受到关注。陈联寿^[1]通过对 Rite (7203)、Billie (7303) 和 Ora (7504) 等台风路径突然西折的分析,首先指出当西风槽切断冷涡移近台风时,导致台风周围基本气流的突变是造成路径突变的重要原因。王达文^[2]通过简单的数值模拟得到冷涡与台风的作用距离为 9 个纬距。费亮^[3]在统计事实的基础上,提出了台风周围不同的环境流场对台风和冷涡相互作用的影响。并进一步分析副热带高层冷涡能造成台风穿越副高北上,出现与引导气流基本垂直的疑难路径^[4]。刘景秀^[5]、浙江省等气象台^[6]对东海台风的突然西折分析也强调了高层冷涡在台风路径突变过程中的重要作用。但是尽管如此,目前对这些突变路径的机制尚未深入了解。本文将利用数值模式来控制高层冷涡的位置和结构变化,考察台风路径变化。同时通过涡度方程的诊断分析,对以下问题进行研究:高层冷涡通过什么方式影响台风路径变化?这种影响归结于什么动力因子?其空间分布又是怎样的?期望通过这些讨论找到比较容易应用于实际预报的因子。

1991年1月21日收到,10月21日收到修改稿。

* 金结莲、吴达铭参加了部分工作。

二、模式与初始条件

本文采用 σ 坐标下半拉格朗日半隐式计算格式的FSU区域模式。详见文献[7],这里仅作简单介绍。

由于本文仅考察冷涡影响台风路径的动力作用,故采用干模式。控制方程为:

$$\frac{Du}{Dt} = -\dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + v(f + \frac{u}{a} \tan \phi) - g \frac{\partial z}{\partial x} - RT \frac{\partial \ln p_s}{\partial x} + F_x \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - u(f + \frac{u}{a} \tan \phi) - g \frac{\partial z}{\partial y} - RT \frac{\partial \ln p_s}{\partial y} + F_y \quad (2)$$

$$\frac{DT}{Dt} = -\dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + kT \left[\frac{\dot{\sigma}}{\sigma} + \frac{D \ln p_s}{Dt} \right] \quad (3)$$

$$\frac{D \ln p_s}{Dt} = -\frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - \nabla \cdot \vec{v} \quad (4)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{g\sigma} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{RT}{\sigma p_s} \quad (6)$$

式中符号均为常用符号。

为提高计算精度,本模式采用跳点网格(staggered grid)。垂直分层取六层,水平范围取 $9.375^\circ-39.375^\circ\text{N}$, $110.625^\circ-148.125^\circ\text{E}$,网格点为 34×34 。由于水平范围小,为保证犬形势的正确,本文作水平侧边界的大尺度资料强迫处理,同时也避免在48小时模拟中侧边界的能量反射。

水平侧边界的大尺度资料和模式结果的耦合采用下列形式:

$$X(I) = W(I)X_m(I) + (1-W(I))X_r(I) \quad (7)$$

其中 $X_m(I)$ 是模式结果, $X_r(I)$ 是资料强迫, $W(I)$ 是权重函数。

$$W(I) = \begin{cases} 0.0 & I = \text{边界网格点} \\ 0.5460 & I = \text{边界-1网格点} \\ 0.7943 & I = \text{边界-2网格点} \\ 0.9068 & I = \text{边界-3网格点} \\ 0.9577 & I = \text{边界-4网格点} \\ 0.9808 & I = \text{边界-5网格点} \\ 1.0 & I = \text{所有内网格点} \end{cases} \quad (8)$$

初始条件采用FGGE III b资料和理想冷涡相结合。资料日期自1979年8月13日00时到15日00时(世界时,下同),间隔为12小时,共计5个时次。包括高度场 z ,风场 u, v 。台风(IRVING)在13日00时的位置在 20.8°N , 126.1°E ,其48小时移向朝西北到北方^[8]。

为进行高层冷涡对台风移动影响的控制试验,设计以下形式的涡旋结构:

$$v_\lambda(\tau, p) = v_\lambda^*(\tau)v_p(p) \quad (9)$$

式中 $v_\lambda^*(\tau)$ 是涡旋的水平结构, $v_p(p)$ 是它的垂直结构。如果是气旋性涡旋,则 $v_\lambda^*(\tau)$ 可以 v_λ^*

(r)表示:

$$v_{ic}^*(r) = v_{mc} \frac{r}{r_{mc}} \left\{ \exp\left[\frac{1}{b_c} \left(1 - \frac{r}{r_{mc}}\right)^{b_c}\right] - \frac{|r - r_{mc}|}{R_{oc} - r_{mc}} \exp\left[\frac{1}{b_c} \left(1 - \frac{R_{oc}}{r_{mc}}\right)^{b_c}\right] \right\} \quad (9a)$$

如果是反气旋性涡旋,则 $v_{ic}^*(r)$ 以 $v_{ia}^*(r)$ 表示:

$$v_{ia}^*(r) = v_{ma} \frac{R_{oa} - r}{R_{oa} - r_{ma}} \left\{ \exp\left[\frac{1}{b_a} \left(1 - \frac{R_{oa} - r}{R_{oa} - r_{ma}}\right)^{b_a}\right] - \frac{|r - r_{ma}|}{r_{ma}} \exp\left[\frac{1}{b_a} \left(1 - \frac{R_{oa}}{R_{oa} - r_{ma}}\right)^{b_a}\right] \right\} \quad (9b)$$

式中 v_{mc}, v_{ma} 分别为最大风速, r_{mc}, r_{ma} 是最大风速半径, b_c, b_a 是决定风速分布形式, R_{oc}, R_{oa} 是涡旋尺度, r 是半径。

涡旋的垂直结构 $v_p(p)$ 可表示为:

$$v_p(p) = \begin{cases} p/400 & p < 400\text{hPa} \\ (2 \times 550 - p)/700 & p \geq 400\text{hPa} \end{cases} \quad (9c)$$

由(9c)式表示涡旋在 400hPa 上的强度最大。本文设计的理想冷涡有以下特征:(1)水平尺度小于台风;(2)冷涡强度的垂直分布在 400hPa 上最强,向下减弱,到 600hPa 以下甚至为反气旋涡旋(见表 1 的试验六)。将理想涡旋分布用客观分析方法^[9]嵌入 FGGE III b 资料中。

三、模拟结果

为了模拟高层冷涡对台风路径影响,设计六种不同位置和垂直结构的冷涡(表 1)。试验一、二、四、五的冷涡有相同的水平和垂直结构,但它们的地理位置各不相同。试验三的冷涡水平结构与上面的相同,但地理位置和垂直结构不一样。设计的强度在整层都无变化,具有相当正压的性质。试验六是参照文献[4]所提到的副热带高层冷涡理想化后设计的,表现在 600hPa 以上是气旋性环流,600hPa 以下为反气旋环流。为比较结果,把无冷涡嵌入的定为试验七。

表 1 高层冷涡在六种试验中的位置、水平和垂直结构分布

类型	600hPa 以上 600hPa 以下		水平结构				垂直结构	地理位置	
	为气旋	为反气旋	v_m (m/s)	r_m (km)	R_c (km)	b		经度(°E)	纬度(°N)
试验一	有	无	30	100	400	1.0	由方程(9c)决定	112.5	22.5
试验二	有	无	30	100	400	1.0	由方程(9c)决定	117.5	22.5
试验三	有	无	30	100	400	1.0	$v_p(p) = 1.0$	118.5	22.5
试验四	有	无	30	100	400	1.0	由方程(9c)决定	119.0	29.0
试验五	有	无	30	100	400	1.0	由方程(9c)决定	126.0	29.0
试验六	有	无	30	200	500	1.0	$v_p(100) = 0.7$ $v_p(250) = 1.0$ $v_p(400) = 0.7$ $v_p(550) = 0.2$ $v_p(700) = -0.2$ $v_p(850) = -0.3$ $v_p(1000) = -0.2$	115.5	22.5
			$v_{ic}^* = -\alpha_c v_{ic} (\alpha_c = 0.3)$						
			30*	600*	800*	1.0*			
			$v_{ia}^* = -\alpha_a v_{ia} (\alpha_a = 0.4)$						

* 表示反气旋涡旋参数,运用方程(9b); ** 表示涡旋的径向运动,即为涡旋的无旋风分量。

以上试验都在 400hPa 上进行。考虑到台风和冷涡都是气旋性旋转系统,它们在高度场和涡度场上的中心差距小于 50km。由这个场反映的台风和冷涡中心移动趋势也相似。

因此为方便起见,本文采用涡度场中心来表示台风和冷涡的中心。

图1是冷涡嵌入后400hPa涡度场分布。图2显示了台风和冷涡48小时路径的部分试验结果。我们发现无冷涡嵌入时台风朝西北到北方向移动(如图中a所示)。有冷涡嵌入后,台风移向改为朝东北(图中b)。同时,由于嵌入冷涡离台风位置的差异,对台风的速度和方向都有一定影响。试验二的台风速度(图中c)比试验一(图中b)的要快。试验四(图中d)和试验五(图中e)的冷涡位置明显不同,造成台风移向差别也较大。联系冷涡路径,还发现与台风有相互气旋性打转现象(图中e)。

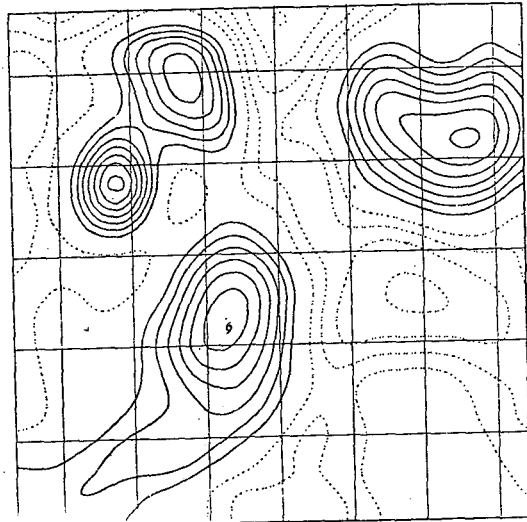


图1 试验四在400hPa上涡度场(实线为正值,虚线为负值。单位: $\times 10^{-5} s^{-1}$,间隔为 $10^{-5} s^{-1}$)

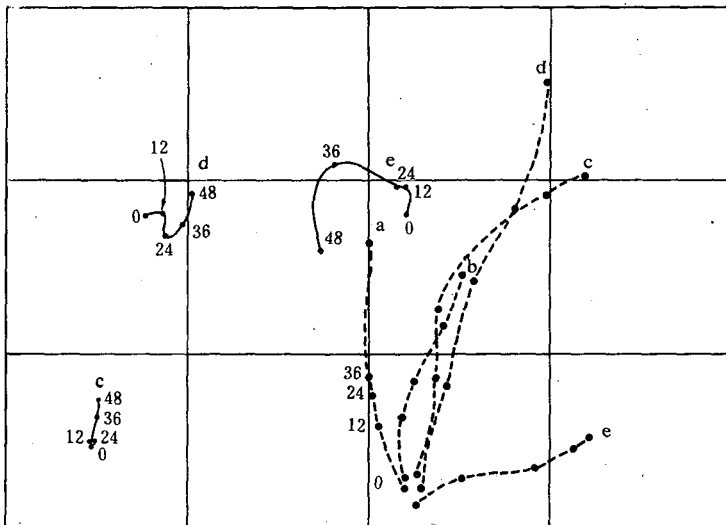


图2 台风和冷涡在400hPa上的48小时模拟路径
(虚线为台风,实线为冷涡)
(图中(a)为无冷涡嵌入;(b)试验一(黑点为冷涡中心);
(c)试验二;(d)试验四;(e)试验五)

试验一、三、六的冷涡垂直结构不同,但模拟的台风路径无明显差异(图略)。在模拟试

验中,还发现强迫侧边界对冷涡移动有一定影响。试验二的冷涡位置离西边界有一段距离,与试验一相比,后者在 48 小时中一直保持在边界几乎不动,而前者有缓慢朝北移动的趋势。

上述试验表明,高层冷涡对台风移动有较明显的作用。冷涡离台风位置的差异,对台风路径有较大影响。

四、动力分析

本文通过涡度方程中各项分布,分析台风路径与冷涡的关系。400hPa 上涡度方程形式为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla \zeta - \beta v - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - (\zeta + f)D - \vec{k} \cdot \nabla \omega \wedge \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} \quad (10)$$

垂直速度是通过质量守恒方程在 100hPa 处 $\omega=0$ 的假定下得到的。

1. 总涡度倾向项 $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ 分布

就试验二、四、五等三个例子讨论总涡度倾向的分布和台风路径的关系。试验二(图 3a)看到涡度中心位置矢量在最大总涡度倾向的右方,两者之间存在一定的角度。试验四的高层冷涡设置在台风西北侧,由此得到的总涡度倾向中心位置相对于试验二更偏东,涡度中心位置矢量和最大总涡度倾向位置非常一致(图略)。这些现象表示最大总涡度倾向和台风中心的移动有关^[10,11,12]。试验五的冷涡位置从台风西北方转到了北方,不但总涡度倾向分布有很大变化,相应的台风移动也有很大改变。此时涡度中心位置矢量和最大总涡度倾向的位置仍然很一致(图 3b)。这表明高层冷涡地理位置变化与总涡度倾向的水平分

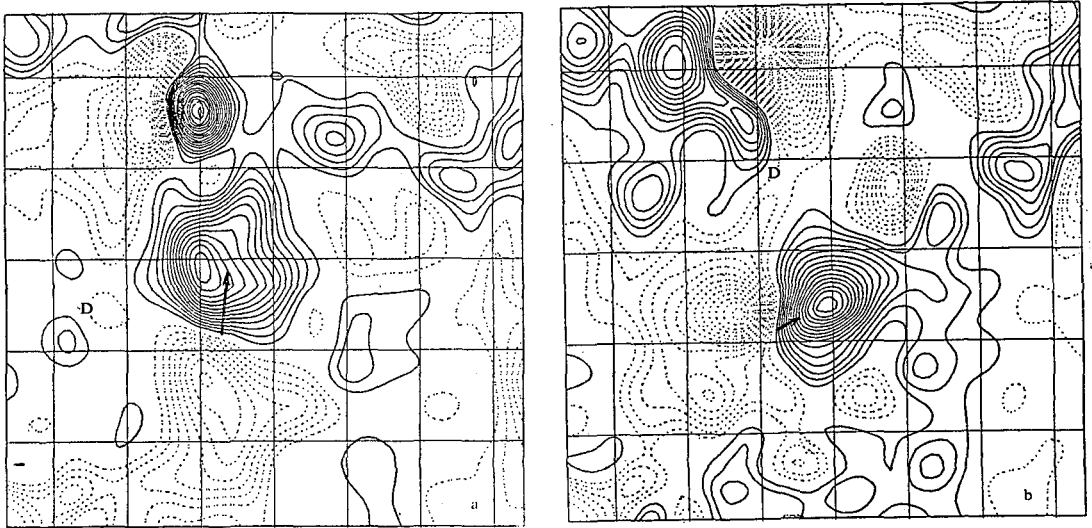


图 3 总涡度倾向分布(a)试验二(b)试验五(实线为正,虚线为负,单位: $\times 10^{-10} \text{s}^{-2}$, 间隔 $2 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$ 黑色矢量为 0-12 小时涡度中心位置矢量)

布有密切联系。

2. 涡度方程各项的水平分布对总涡度倾向贡献

以试验四为例。讨论涡度方程(10)右端各动力项的水平分布以及对总涡度倾向的贡献(见图4)。

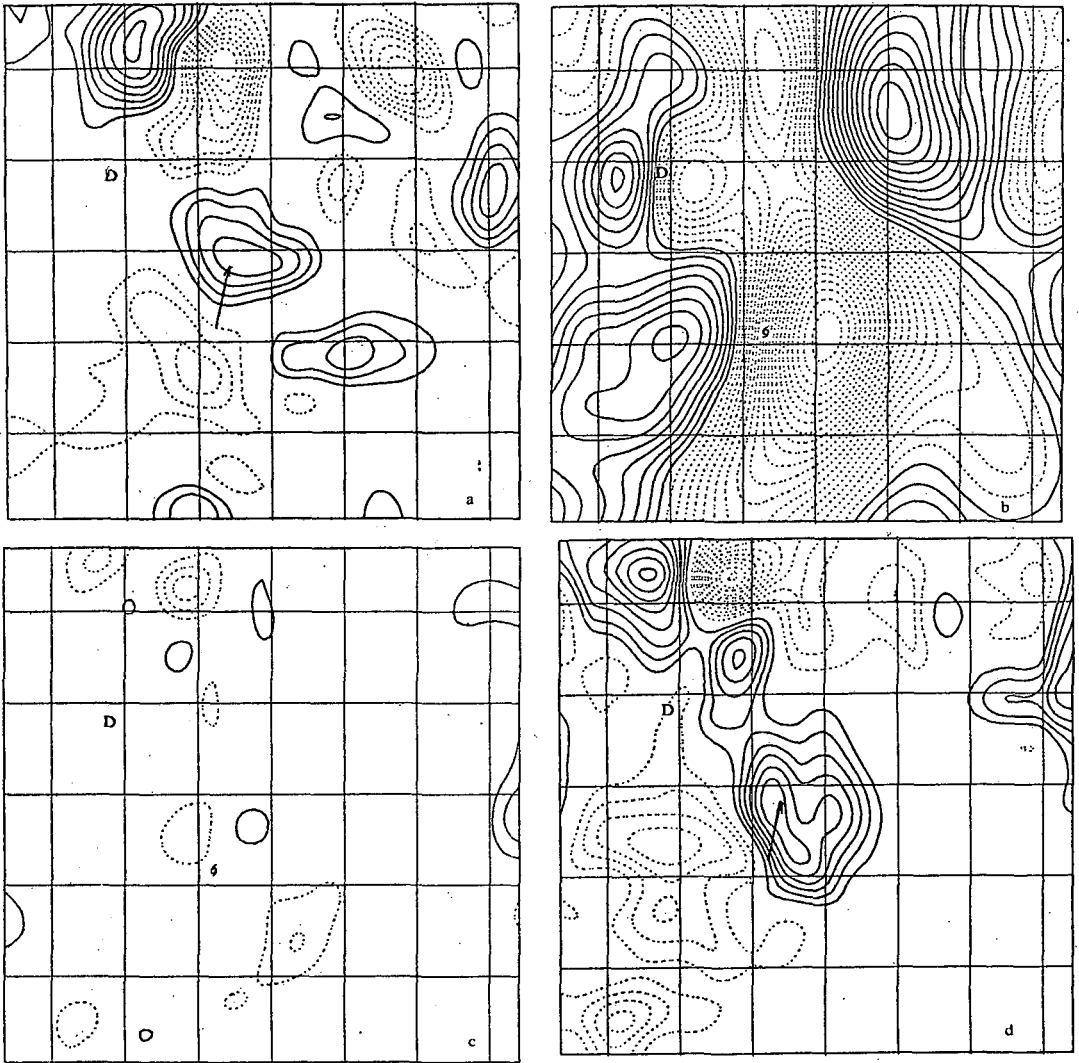


图4 涡度方程各项的水平分布(试验四) (a)涡度水平平流 (b) β 项 (c)涡度垂直变化 (d)散度项(实线为正值,虚线为负值,单位 10^{-10}s^{-2} ,间隔 $2 \times 10^{-10}\text{s}^{-2}$, β 项间隔为 $0.2 \times 10^{-10}\text{s}^{-2}$)

图4a反映了涡度水平平流项的分布。此时的最大中心值在台风中心北侧,和涡度中心位置矢量有一定关系。这表明该项对总涡度倾向有较大正贡献。

从 β 项的水平分布(图4b)可以发现在台风和高层冷涡两侧各有明显的不对称环流存在。这是典型的 β 陀螺结构^[11,13]。由于最大正涡度倾向中心在台风西侧,台风将朝西移

动。因此 β 项对总涡度倾向的贡献在这里是负的。

涡度垂直变化项的量级和 β 项一样,但比水平平流项要小(图 4c)。在台风中心东北侧是正中心,西北侧是负中心。所以该项作用将使台风朝东北方向移动。

散度项的水平分布见图 4d。它的量级与水平平流项相同,甚至更大。正中心的方向与涡度中心位置矢量颇为一致。表明散度项对总涡度倾向有较大正贡献。

扭转项的贡献较小(图略)。

根据上述讨论,可看到涡度水平平流项和散度项对总涡度倾向的贡献较大,尤以散度项作用更甚。这种在具有垂直运动耦合的大气中,散度项并非小项的结论与 Shapiro 等^[14]在正压模式中得到的结果很不相同。

定量计算台风周围 3—4 个纬距内各项涡度的最大正值,结果见表 2。可以看到除冷涡位置较远的试验一和没有冷涡嵌入的试验七以外,涡度水平平流和散度项在其它五个试验中贡献最大。

表 2 台风周围各项涡度的最大正值分布(单位: 10^{-10}s^{-2})

类 型	总涡度倾向	涡度水平平流	β 项	涡度垂直变化	散度项	扭转项
试验一	12.4	10.1	1.2	6.5	7.3	3.0
试验二	26.6	11.3	1.0	2.1	21.0	2.1
试验三	26.7	13.1	1.2	2.0	18.5	3.0
试验四	19.1	8.5	1.7	2.2	13.1	4.9
试验五	31.9	9.1	1.7	0.5	27.1	2.1
试验六	29.2	9.3	1.0	2.2	21.0	4.2
试验七	11.1	10.3	2.5	10.8	4.9	2.0
平 均	22.4	10.2	1.5	3.8	16.1	3.0

3. 涡度水平平流项和散度项对台风路径的贡献

首先计算台风中心 0—12 小时位置矢量和涡度水平平流及散度项最大中心之间的角度。正值表示台风位置矢量偏于平流项或散度项最大中心之右,负值表示偏于其左(见表 3)。考虑到试验一和试验七的散度项较小,因此未计算它们与台风位置矢量的角度。由表 3 不难发现,台风中心位置矢量均偏于水平平流项和散度项最大中心值的右侧,角度的大小亦相似。这种系统性的偏右现象可认为这两项对台风移动具有同样重要的贡献。试验四和试验五两项偏角数值相当,但符号相反。由这两项相加后的方向和台风 12 小时位置矢量应相似。

表 3 台风中心位置矢量与涡度水平平流及散度项最大中心值之间的角度

类 型	试验一	试验二	试验三	试验四	试验五	试验六	试验七	平 均
涡度水平平流	28°	1.0°	25.0°	-11.5°	12.0°	13.5°	18°	12.3°
散 度	-	24.0°	13.0°	11.5°	-15.0°	25.0°	-	11.7°

最后还选择三个试验计算以上这些偏角的时间变化。由分析可知,这些时间变化并不存在规律性,但是台风中心在离最大总涡度倾向中心 $\pm 22.5^\circ$ 的 45 度扇形区内移动。这一结果为业务预报提供了一种参考依据。

五、结 论

本文用 FSU 六层区域性斜压模式模拟了高层冷涡对台风运动的影响,并用涡度方程分析了台风不同路径下其周围总涡度倾向的分布情况,得到以下结论:

1. 高层冷涡的存在会影响台风的移动。其影响程度取决于高层冷涡相对于台风的方位和距离。至于高层冷涡结构对台风运动的影响,本文还不足以得到任何结论,将在另文中讨论。

2. 高层冷涡影响台风路径是通过改变台风中心周围总涡度倾向的分布来达到的。通过改变高层冷涡地理位置的敏感性模拟,清楚地表明了台风路径的变化直接联系着台风周围环流的改变。

3. 总涡度倾向和台风路径的关系能证明 Chan^[10]的观测分析结果和 Holland^[11]提出的假设的正确性。总涡度倾向变化主要来自于涡度水平平流项和散度项的贡献。这说明台风运动主要由正压性动力因子控制。

上述结论仅仅是在数值模拟的动力分析基础上得到的。还有待观测资料的进一步证实。

参 考 文 献

- [1] Chan, J. C. -L., and W. M. Gray, Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1354-1384, 1982.
- [2] 王达文,北上台风异常路径数值试验的初步探讨,台风会议文集,317-320,上海科学技术出版社,1981年。
- [3] 费亮,徐静远,中纬度高层切断冷涡与台风路径的关系,台风会议文集,61-71,上海科学技术出版社,1981年。
- [4] Fei Liang, X. Zongyuan, and Q. Junrui, Influence of cold vortex over subtropical high level on typhoon track, *Acta Oceanologica Sinica*, **2**, 22-33, 1983.
- [5] 刘景秀,冷涡与台风,气象,8,6-7,1978。
- [6] 浙江、江西、江苏和山东省气象台,7504号台风的分析,台风会议文集,102-104,上海科学技术出版社,1976年。
- [7] Bohra, A. K., M. C. Sinha, A. Kumar, J. Sheng and T. N. Krishnamurti, A documentation of the FSU regional prediction model, Florida State University, Tallahassee, 253 pp, 1986.
- [8] Annual Typhoon Report, JTWC, Guam, 191 pp, 1979.
- [9] Tripoli, G. J. and T. N. Krishnamurti, Low-level flows over the GATE area during summer 1972, *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 197-216, 1975.
- [10] Chan, J. C. -L., An observational study of the physical processes responsible for tropical cyclone motion, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1036-1048, 1982.
- [11] Holland, G. J., Tropical cyclone motion, Environmental interaction plus a beta effect, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 328-342, 1983.
- [12] Holland, G. J., Tropical cyclone motion, A comparison of theory and observation, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 68-75, 1984.
- [13] Ferino, M., and R. L. Elsberry, Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975-990, 1987.
- [14] Shapiro, L. J., and K. V. Doyama, Barotropic vortex evolution on a beta plane, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 170-187, 1990.

NUMERICAL SIMULATION AND DYNAMIC ANALYSIS OF
INFLUENCE OF UPPER-TROPOSPHERIC COLD VORTEX
ON THE TRACK OF TYPHOON

Fei Liang Li Xiaofan

(*Shanghai Typhoon Institute, Shanghai, 200030*)

Abstract

By six-level dry baroclinic model, the influences of upper-level cold vortex on the typhoon motion are simulated. The diagnostic analyses are carried out by using vorticity equation. It is found that the influence of upper-level cold vortex on typhoon motion is produced through changing the circulation structure around typhoon center. The results also show that the motion is directly related to total vorticity tendency, and this relationship is stable. Meanwhile, it is revealed that total vorticity tendency mainly comes from the horizontal advection of vorticity and divergent term, which means that typhoon motion is controlled by barotropic dynamic factors.