

# 高层冷涡的不同结构对台风运动的影响

费亮 李小凡\*

(上海台风研究所, 上海 200030)

## 提 要

通过对不同水平和垂直结构的高层冷涡在台风移动中的作用的对比试验,发现高层冷涡的水平和垂直结构变化会影响台风的运动。对总涡度倾向分布和强度的比较分析,发现正压过程主导台风运动的方向,而斜压过程在某些情况下对台风移速有很大影响。通过各动力项对总涡度倾向贡献的讨论,发现涡度平流对总涡度倾向正中心的贡献主要来自引导气流对非对称涡度场的平流。散度场贡献主要来自行星涡度和非对称散度相关场。最后还得到预报性的结论:台风朝对流层上层的辐合中心或对流层中下层辐散中心方向移动。

**关键词:**冷涡结构;台风运动;总涡度倾向。

## 1 引 言

文献[1]虽然证实了高层冷涡对台风运动影响是通过改变台风中心周围的环流结构达到的,并发现与总涡度倾向分布有关。但是由于设计的冷涡位置都不同,因此很难估计冷涡结构的变化对台风运动的影响。本文首先在影响台风运动的位置上设计不同水平和垂直结构的高层冷涡,进一步考察它们对台风的影响,并讨论各动力项对总涡度倾向的贡献。

## 2 数值模拟和动力分析

文献[1]中的试验5指出,位于 $29.0^{\circ}\text{N}$ 、 $126.0^{\circ}\text{E}$ 的高层冷涡对台风移动影响较为明显,并与台风有相互气旋性旋转的现象。基于这样的结果,本文设计的4个试验冷涡都置于这同一位置。表1列出4个冷涡的参数表,为进行比较,又重新引入文献[1]中试验5的冷涡参数。

由表1可见,试验8与试验5相比, $R_0$ 扩大了200km,反映了冷涡水平尺度的变化。试

1991年1月21日收到,10月21日收到修改稿。

\*金结莲、吴达铭参加部分工作。国家自然科学基金49070238支持项目。

验 9 的  $v_m$  取  $15\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 比试验 8 的冷涡强度减弱一半。试验 10 的冷涡垂直结构具有相当正压性质, 与前面相比, 反映了垂直结构的变化。试验 11 的冷涡只反映在 600hPa 以上, 在 600hPa 以下已成为反气旋环流了。这种垂直配置的变化, 造成散度风的存在, 伴有垂直运动的出现, 使高低层系统耦合成为一个整体。

表 1 5 个试验的高层冷涡参数

试 验	600hPa 以上为气旋	600hPa 以下为反气旋	水平结构				垂直结构	一般描述
			$v_m$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	$r_m$ (km)	$R_0$ (km)	$b$		
8	有	无	30	100	600	1.0	由文献[1]中(9c)决定	强又大的高层冷涡
9	有	无	15	100	600	1.0	由文献[1]中(9c)决定	弱而大的高层冷涡
10	有	无	30	100	600	1.0	$v_p(p)=1.0$ 对所有 $p$ 成立	相当正压涡旋结构
11	有	有	30	100	600	1.0	$v_p(100)=0.75,$ $v_p(250)=0.63$ $v_p(400)=1.0,$ $v_p(550)=0.2$ $v_p(700)=-0.2$ $v_p(850)=-0.3$ $v_p(1000)=-0.2$	类似副热带高层冷涡  垂直结构: $v_{rc} = -\alpha_c v_{\lambda c}$ ( $\alpha_c = 0.3$ ) $v_{ra}^* = -\alpha_a v_{\lambda a}$ ( $\alpha_a = 0.4$ )
5	有	无	30	100	400	1.0	由文献[1]中(9c)决定	强而小的高层冷涡

\* 参数表示反气旋涡旋, 适用于文献[1]中的方程(9b)

\*\* 参数表示涡旋的径向运动分量, 即涡旋的无旋风部分

上述试验均在 400hPa 上进行, 并作 48 小时模拟。初始场准备、模式格式和时间步长等可参见文献[1]。下面将根据试验结果, 分别讨论不同结构的高层冷涡对台风周围总涡度倾向分布的差异以及对台风移动的影响。

## 2.1 水平尺度变化

图 1a、1b 表示了试验 8 和试验 5 的冷涡和台风路径。可以看出冷涡水平尺度的变化对台风的移动方向影响不大, 而对台风的移动速度却引起一定差异。试验 8 的冷涡直径大, 台风移速快, 尤其在最初和最后的 12 小时内, 差异比较明显。台风周围的总涡度倾向分布型式在这两个试验中非常相似, 但正中心值有区别。试验 8 为  $37.8 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$  (图 2), 试验 5 为  $31.9 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$  (图略), 两者之比为 1.18。试验 8 的台风速度比试验 5 快将近 30%。台风移速与冷涡水平尺度成正比。

## 2.2 强度变化

试验 9 的冷涡强度弱。模拟结果表明, 它的台风路径与试验 8 相比, 除 24—36 小时时段内稍有差异外, 总的趋势基本相同 (图 1c)。就速度而言, 试验 9 明显偏慢。分析其总涡度倾向分布, 与试验 8 的也很相似, 只是中心值稍低, 为  $33.6 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$  (图略)。这与上节中提到的影响台风速度的结论是一致的。

## 2.3 垂直结构变化

试验 10 设计的冷涡具有相当正压的性质。它的强度和结构在整个垂直层中均相同

(表 1)。这是一种理想化的结构, 目的是考察冷涡的垂直结构变化对台风路径的影响。图 1d 是试验 10 的台风冷涡路径。与图 1a 相比, 台风在 24 小时以后呈明显的反气旋式移动并迅速南落, 与冷涡之间呈现出相互排斥的现象。由于本文选用的模式是多层的, 所以台风和冷涡之间的相互作用在其它层次上的反映可因其在各层的不同强度而不同。

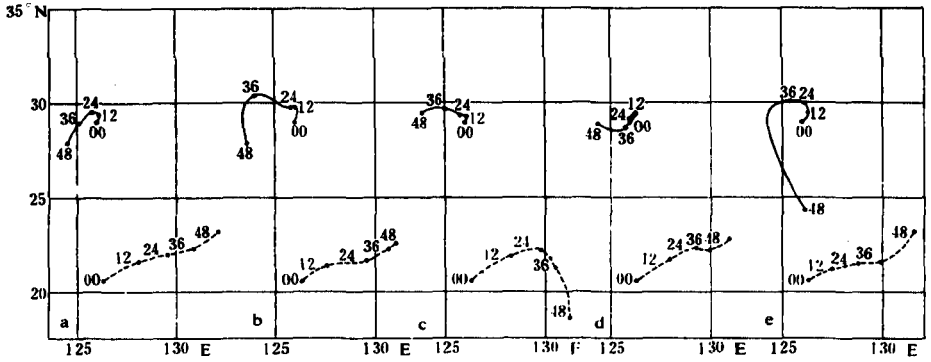


图 1 台风和冷涡 48 小时路径模拟图 (a) 试验 8 (b) 试验 5 (c) 试验 9 (d) 试验 10 (e) 试验 11  
(实线为冷涡路径, 虚线为台风路径)

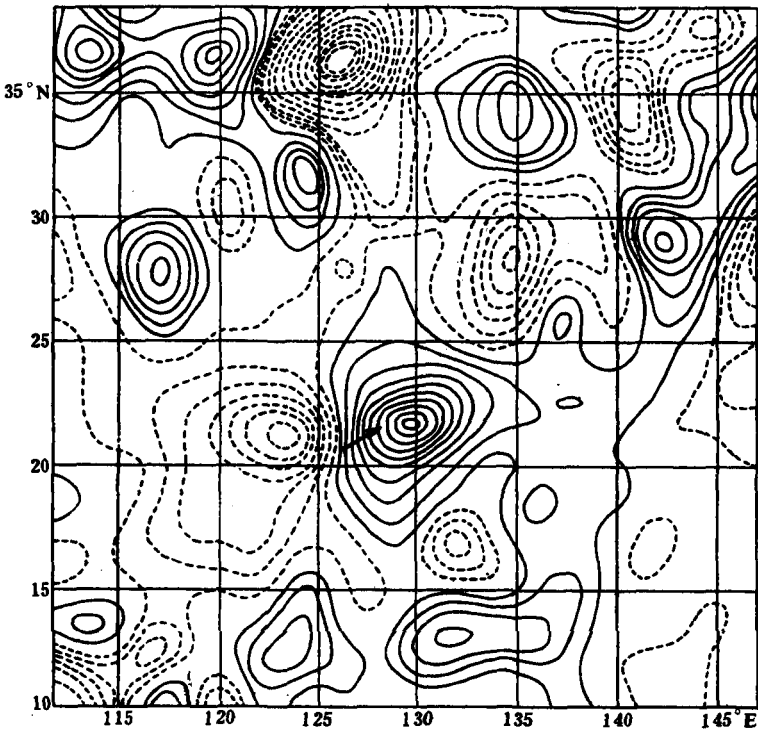


图 2 试验 8 的初始总湿度倾向分布

(单位:  $10^{-10} s^{-2}$ , 实线为正值, 正中心强度为  $37.8 \times 10^{-10} s^{-2}$ , 虚线为负值, 黑色矢为 0-12 小时湿度中心位置矢量)

参照文献[3]所介绍的副热带高层冷涡, 试验 11 设计的冷涡仅在 600hPa 以上是气旋性环流, 在 600hPa 以下已没有反映, 甚至为反气旋环流。同时还伴有高低层辐合辐散配置

的垂直运动耦合。这样的结构使 400hPa 附近的垂直切变增大,造成冷涡附近的总涡度倾向中心值高达  $70.7 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$  (图略),比台风中心附近的总涡度倾向中心值强 1 倍,冷涡路径因而受到影响。在 36—48 小时内迅速南移达 5 个纬距以上(图 1e),台风移向由偏东转为东北,台风与冷涡之间出现相互吸引趋势。这时位于台风附近的总涡度倾向中心值虽然仍与试验 8 中的几乎一样,但由于散度风存在,加强了环流之间的相互作用,使台风移速受到影响,呈偏慢趋势。

通过上述试验,有以下几点意见:(1)当高层冷涡处于能影响台风移动的位置上时,冷涡的水平和垂直结构的变化会影响台风的路径。

(2)在高层冷涡垂直结构相同的前提下,如果水平尺度大,强度强,则台风移速会加快。反之,将使台风移速减慢。但是水平尺度和强度的大小对台风移向无太大影响。

(3)垂直结构不同的冷涡会影响台风路径。正压性质的理想冷涡与台风有相互排斥的现象。当冷涡伴有辐散辐合的高低空配置及垂直运动耦合时,与台风之间出现相互吸引的现象。

(6)当冷涡垂直结构比较复杂时,由于台风运动受周围系统和上下层环流的作用,台风移速和总涡度倾向正中心强度并不成正比关系。这和 Holland<sup>[4]</sup>在 1983 年提出的涡度移动的假定不同。不管冷涡具有什么样的水平和垂直结构,台风移向与总涡度倾向的正中心方向基本吻合。由此看来斜压过程对台风移向并不重要,而对台风速度影响较大。

### 3 流场对称/非对称分量的分解与总涡度倾向

文献[1]指出总涡度倾向的贡献主要来自相对涡度平流和散度场。然而,从流场结构来看,它是由引导气流(常数)、涡旋对称分量(即主分量,仅为半径的函数)和涡旋非对称分量(由于涡旋的运动、积云对流等造成)组成。即

$$\vec{v} = \vec{v}_{st} + \vec{v}_{sym} + \vec{v}_{asym} \quad (1)$$

因此,总涡度倾向为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = & -\vec{v}_{st} \cdot \nabla \zeta_{sym} - \vec{v}_{st} \cdot \nabla \zeta_{asym} - \vec{v}_{sym} \cdot \nabla \zeta_{sym} - \vec{v}_{sym} \cdot \nabla \zeta_{asym} - \vec{v}_{asym} \cdot \nabla \zeta_{sym} - \\ & \vec{v}_{asym} \cdot \nabla \zeta_{asym} - \zeta_{sym} \cdot D_{sym} - \zeta_{sym} \cdot D_{asym} - \zeta_{asym} \cdot D_{sym} - \zeta_{asym} \cdot D_{asym} - fD_{sym} - fD_{asym} + R \end{aligned} \quad (2)$$

式中的  $R$  是  $\beta$  项、涡度垂直变化项和扭转项的总和。由于它们对总涡度倾向的贡献小,这里不作讨论。

#### 3.1 对称/非对称分量的分解

将直角坐标上的流场、涡度场和散度场的值转移到柱坐标上。切向平均量就是对称分量,其余的量均为非对称分量。Holland<sup>[4]</sup>认为气旋中心区流场中,除去对称分量后的余值

为引导气流,这样定义实际上并不十分确切,应该是除去对称分量及由于运动引起的非对称分量后才可计算引导气流,因此本文假定此时的引导气流为常数,即没有水平切变。用非对称场的面积平均得到引导气流及散度、涡度场的对称和非对称分量,然后计算方程(2),最后将所得计算值再转到直角坐标,绘制成图。

### 3.2 结果和讨论

以试验 8 为例,散度对称分量比涡度的对称分量小一个量级(图略)。在半径为 400km 的范围内,涡度对称分量为正值,而散度正值(辐散)在 120km 以内,120km 以外是负值(辐合)。图 3 是散度非对称场分布,可看到呈明显的切向一波结构。在中心以东,即台风前进方向是辐合,中心以西为辐散。它的量级与对称分量相同,但前者比后者大。涡度的非对称场也是切向一波结构,中心西北方为负涡度,东南方为正涡度(图略)。这种分布与文献[2]中的非对称涡旋分量形式正好相反。由于本试验基于有基本气流情况下,所以非对称结构明显受基本气流的影响,同时也表明引导气流在这里可能不应该是一个常值。下面就方程(2),逐项讨论它们的贡献。

$S_1$  表示引导气流对涡度对称场的平流,此项是总涡度倾向的最大正值,在台风区域为正值,最大中心在台风中心,且东西、南北对称,对总涡度倾向有正贡献(图 2)。

$S_2$  是引导气流对非对称涡度场的平流,由图 4 反映出此项最大正值位于总涡度倾向最大正值附近,它对涡度平流项的贡献最大,也就是对总涡度倾向的贡献最大。

$S_3$  是对称涡旋对涡度对称场的平流,它的分布与  $S_1$  相似,但量级要小一半。

$S_4$  是对称涡旋对非对称涡度场的平流, $S_6$  是非对称涡旋对非对称涡度场的平流。它们的空间分布相似,但  $S_4$  是正值而  $S_6$  是负值。两者为两个大量抵销后的小的正量,具有正贡献。

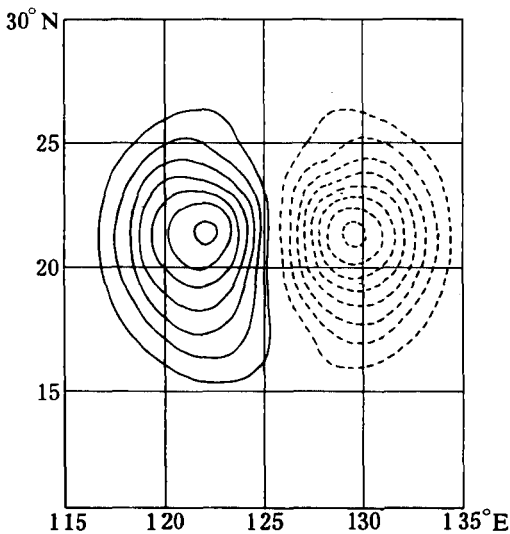


图 3 试验 8 在 400hPa 上的散度非对称场分布  
(虚线为负值,实线为正值,间隔  $2 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$ )

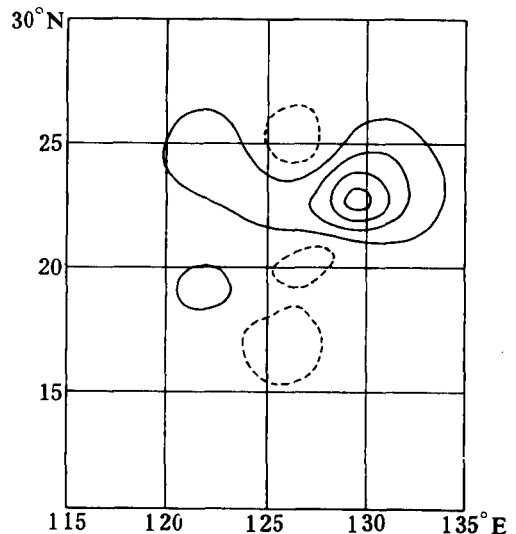


图 4  $S_2$  项的分布(间隔为  $2 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$ )

$S_5$  是非对称涡旋对涡度对称场的平流, 近似于切向二波结构, 对总涡度倾向正贡献较小。

$S_7$  是对称涡度和对称散度场对散度项的贡献, 在台风中心部分为负值, 外围为正值。量级较小, 其贡献可不计。

$S_8$  是对称涡度和非对称散度场对散度项的贡献, 是切向一波结构, 但与散度场的位相相反, 中心比非对称散度场更接近台风中心, 此项为散度项对总涡度倾向贡献较大的分量之一。

$S_9$  是非对称涡度和对称散度场对散度项的贡献, 由于对称散度量级小, 其贡献可不计。

$S_{10}$  是非对称涡度和非对称散度场对散度项的贡献, 具有切向二波结构, 其正值中心与总涡度倾向的正中心吻合(图略)。

$S_{11}$  是行星涡度和对称散度场对散度项的贡献, 其分布相似于  $S_7$ , 由于量级小, 贡献不计。

$S_{12}$  是行星涡度和非对称散度场对散度项的贡献, 此项为对总涡度倾向贡献最大的分量, 其结构为切向一波(图 5), 位相与非对称散度场(图 3)相反。

通过上面分析可归纳为以下两点:

(1) 涡度平流对总涡度倾向正中心贡献大, 主要来自于引导气流对非对称涡度场的平流。

(2) 散度项对总涡度倾向正中心的贡献远大于涡度平流项的贡献。主要来自和非对称散度场有关的项, 其中以行星涡度和非对称散度场对散度项的贡献最大, 占 50% 以上。

根据上述结论, 同时考虑到行星涡度在北半球为正值, 且在不太大的范围里, 其值变化不大, 因此台风会向 400hPa 上台风区域里的辐合中心移动。由于台风有积云对流和强烈垂直运动的耦合, 台风应向对流层中下层的台风区域内辐散中心方向移动。实际上, 文献[5]中已指出在 525hPa 以下各层, 台风前进方向均呈现辐散。根据质量守恒, 对流层高层应为辐合。

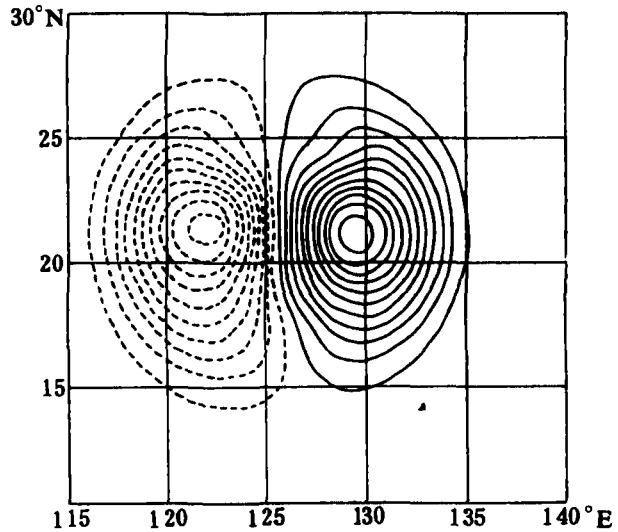


图 5  $S_{12}$  项分布(间隔为  $0.5 \times 10^{-10} s^{-2}$ )

## 4 结 论

应用 FSU 六层斜压干模式模拟不同水平和垂直结构的高层冷涡对台风移动的影响, 有以下结论:

(1) 当高层冷涡处于能影响台风移动的位置上时, 冷涡的不同结构能影响台风移动。

(2) 通过对总涡度倾向分布和强度的比较分析, 发现正压过程能主导台风移向, 而斜压过程在某些情况下对台风移速有较大影响。

(3) 涡度平流对总涡度倾向的正贡献主要是引导气流对非对称涡度场的平流, 而散度项的贡献主要来源于行星涡度和非对称散度相关场。

(4) 台风朝对流层高层台风附近的辐合中心或对流层中下层台风附近的辐散中心方向移动。

### 参 考 文 献

- 1 费亮, 李小凡. 对流层高层冷涡对台风路径影响的数值模拟和动力分析, 应用气象学报, 1992, 3(4): 385—393.
- 2 Fiorino M. and R. L. Elsberry. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, 1989, 46(7/8): 975—990.
- 3 费亮, 薛宗元, 邱君瑞. 副热带高层冷涡对台风路径的影响. 海洋学报, 1982, 4(5): 545—554.
- 4 Holland G. J. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. *J. Atmos. Sci.*, 1983, 40(2): 328—342.
- 5 Elsberry R. L., W. M. Frank, G. J. Holland, J. D. Jarrell and R. L. Southern. A global view of tropical cyclones. available from the Dept. of Meteor., Naval postgraduate school, Monterey, CA 93943, 1987, 185.

## THE INFLUENCE OF STRUCTURE OF UPPER-TROPOSPHERIC COLD VORTEX ON TYPHOON MOTION

Fei Liang      Li Xiaofan

(Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030)

### Abstract

The role of upper-tropospheric cold vortex with different horizontal and vertical structures in the process of typhoon movement is studied. It is found that the structural variation of aloft cold vortex will affect the typhoon motion. The analysis shows that barotropic processes dominate in direction of motion, but, under some circumstances, baroclinic processes dominate in its speed. Furthermore, it is also shown that contribution of horizontal vorticity advection to the positive center of TVT (total vorticity tendency) comes from the advection of asymmetric vorticity with steering current, and contribution of divergence field to TVT is mainly from the correlation field between the planetary vorticity and asymmetric divergence. Finally, it is concluded that within the ranging affected by the cold vortex, typhoon will move to the regions of convergence center in the upper-troposphere or divergence center in the mid-and-lower troposphere. This conclusion is useful to forecasters.

**Key words:** Typhoon motion; Cold vortex; Total vorticity tendency.