

# 涡旋相互作用及其对强度和路径的影响\*

马镜娴 罗哲贤

(南京气象学院, 南京 210044)

**摘 要** 研究一个台风涡旋和一个低压涡旋之间的相互作用。该相互作用使低压涡旋强度衰减的速率显著变慢, 使低压涡旋滞留在初始位置附近的时间显著加长。在低压涡旋强度演化和路径变化的过程中, 显示出清楚的临界点现象。

**关键词:** 能量频散; 涡旋; 非线性; 临界点现象

## 1 引言

Chan 和 Williams<sup>[1]</sup>曾提出过一个解析公式, 由此式可知, 由于二维 Rossby 波的频散涡旋强度随时间的变化是单调下降的, 这是一个线性框架的结果。一般而言, 涡旋相互作用过程往往是一个强非线性的过程。本文将分析这种相互作用对涡旋强度演化和涡旋路径的影响, 着重分析与此有关的非线性行为。

## 2 模式和试验设计

带有环境基流的准地转正压涡度方程, 其无量纲形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + J(\psi, \nabla^2 \psi) + \left( \beta - \frac{d^2 \bar{u}}{dy^2} \right) \frac{\partial \psi}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \psi = 0, \quad (1)$$

式中,  $\psi$  为扰动流函数,  $\beta = df/dy$ ,  $f = 2\Omega \sin \varphi$ ,  $\beta$  平面中线处  $\varphi = 35^\circ \text{N}$ ,  $\bar{u}(y)$  为环境基流; 无量纲化时,  $L$ ,  $(\beta L)^{-1}$  分别为特征水平尺度和特征时间尺度; 令  $L = 500 \text{ km}$ ,  $\beta = 1.875 \times 10^{-11} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 时步  $10 \text{ min}$ 。

计算区域  $4000 \text{ km} \times 4000 \text{ km}$ , 水平格距  $\Delta x = \Delta y = 26.667 \text{ km}$ , 计  $151 \times 151$  个格点。  $I = 1, 2, \dots, 151$ , 沿东西方向自西向东依次增大;  $J = 1, 2, \dots, 151$ , 沿南北方向自南向北依次增大。基流随南北方向格点  $J$  的变化由下式给出,

$$\bar{u}(J) = u_1 \sin\left(\frac{J - J_1}{J_2 - J_1}\right)\pi + u_2 \sin 2\left(\frac{J - J_1}{J_2 - J_1}\right)\pi.$$

在  $\beta$  平面南北边界,  $J = J_1, J_2$ ,  $\bar{u} = 0$ ; 在  $\beta$  平面中线,  $J = 76$ ,  $\bar{u} = u_1$ 。  $J = 38$  处 (相当于  $25^\circ \text{N}$  附近), 上式右端第一项约为  $0.7u_1$ , 第二项约为  $1.0u_2$ 。若  $u_1 > 0$ ,  $u_2 < 0$ , 同时  $|u_2| > 0.7u_1$ , 则  $25^\circ \text{N}$  附近为东风基流,  $35^\circ \text{N}$  以北均为西风。本文试验

选取两类基流: 第 I 类,  $u_1 = 5 \text{ m/s}$ ,  $u_2 = -5 \text{ m/s}$ , I 类基流在  $25^\circ\text{N}$  附近为东风带, 其北为西风带, 初始时刻台风中心位于东风气流之中; 第 II 类,  $u_1 = 8 \text{ m/s}$ ,  $u_2 = -5 \text{ m/s}$  ( $1 \leq J \leq 76$ ),  $u_2 = 0$  ( $76 < J \leq 151$ ), II 类基流在  $25^\circ\text{N}$  附近风速很小, 为弱环境流场, 其北仍为西风带。

南、北边界处, 令  $\psi = 0$ , 东西边界为循环边条件。初始时刻存在两个涡旋, 其相对涡度的空间分布为

$$\xi_i(x, y) = \left( \frac{2v_{mi}}{r_{mi}} \right) \left( 1 - \frac{0.5r_i}{s_i r_{mi}} \right) \exp\left( -\frac{1}{s_i r_{mi}} \right), \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

式中  $v_m$  为涡旋最大风速,  $r_m$  为最大风速半径。在一定的参数范围, (2) 式描述台风涡旋<sup>[1]</sup>。令  $i=1$  时,  $v_{m1} = 20 \text{ m/s}$ ,  $r_{m1} = 200 \text{ km}$ ,  $\xi_1(x, y)$  相当于一个范围较大的弱台风; 令  $i=2$  时,  $v_{m2} = 15 \text{ m/s}$ ,  $r_{m2} = 100 \text{ km}$ ,  $\xi_2(x, y)$  相应于范围较小的低压涡旋。 $s_i$  为非对称参数, 台风涡旋为非对称结构, 在第 1、2、3、4 象限,  $s_1$  分别取值 1.1、1.0、0.9 和 1.0; 低压涡旋为对称结构,  $s_2 = 1.0$ ;  $r_i = \sqrt{(x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2}$ ,  $(x_{01}, y_{01})$ ,  $(x_{02}, y_{02})$  分别为初始场上台风涡旋和低压涡旋中心的坐标; (2) 式中  $i=1$ ,  $s_1 = 1.0$  时, 即为 Chan 和 Williams<sup>[1]</sup>所用的相对涡度初始场的表达式。这时, 按 (2) 式,  $r_1 < 2r_{m1}$ ,  $\xi_1 > 0$ ;  $r_1 > 2r_{m1}$ ,  $\xi_1 < 0$ 。在  $\xi_1$  的负值区,  $\xi_1$  的取值较小, 如  $r_1 = 2.5r_{m1}$ ,  $3.0r_{m1}$ ,  $4.0r_{m1}$  处,  $\xi_1$  分别为  $\xi_{1\max}$  的  $-0.021$ 、 $-0.025$  和  $-0.018$  倍。 $\xi_{1\max}$  为涡旋相对涡度的极大值。在 Ohnishi<sup>[2]</sup>的工作中, 在初始场上涡旋边缘区域,  $\xi_1$  亦取负值, 取值也较小。

实施 10 个试验, 积分时间均为 5 个模式日, 计算区域左下角为坐标原点 (0,0)。

试验 1: 初始低压涡旋中心的坐标  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (1600, 1470) (单位: km, 下同), 该坐标在下文图 3a 上以点 O 标出, 无台风涡旋, I 类基流。

试验 2:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (1600, 1470), 初始台风涡旋中心的坐标  $(X_{T0}, Y_{T0})$  为 (3067, 800), 低压涡旋位于台风涡旋的西北方, 两个涡旋中心相距 1611 km, I 类基流。

试验 3:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (1600, 1470), 无台风涡旋, II 类基流。

试验 4:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (1600, 1470),  $(X_{T0}, Y_{T0})$  为 (3200, 1013), 两个涡旋中心相距 1663 km, II 类基流。

试验 5:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (1120, 1547), 无台风涡旋, I 类基流。

试验 6:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (1120, 1547),  $(X_{T0}, Y_{T0})$  为 (3067, 800), 两个涡旋中心相距 2085 km, I 类基流。

试验 7:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (800, 1733), 无台风涡旋, I 类基流。

试验 8:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (800, 1733),  $(X_{T0}, Y_{T0})$  为 (3067, 800), 两个涡旋中心相距 2451 km, I 类基流。

试验 9:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (667, 1600), 无台风涡旋, I 类基流。

试验 10:  $(X_{d0}, Y_{d0})$  为 (667, 1600),  $(X_{T0}, Y_{T0})$  为 (3067, 800), 两个涡旋中心相距 2530 km, I 类基流。

3 主要结果

试验中，每隔 6 h，输出一张相对涡度分布图，对台风涡旋区域和低压涡旋区域，分别求出相对涡度的极大值，以此代表涡旋强度。我们首先分析涡旋强度随时间的变化。

3.1 涡旋相互作用使低压涡旋强度衰减的速率变慢

I 类基流条件下，在 120 h，曲线  $N_1$ （图 1a，试验 1，无相互作用）涡旋强度为初始强度的 38%；曲线  $I_1$ （图 1a，试验 2，有相互作用）涡旋强度为初始强度的 69%。II 类基流条件下，在 120 h，曲线  $N_2$ （图 1b，试验 3，无相互作用）涡旋强度为初始强度的 33%；曲线  $I_2$ （图 1b，试验 4，有相互作用）涡旋强度为初始强度的 41%。分析说明两点，第一，涡旋相互作用可以使低压涡旋强度衰减的速率变慢，有助于低压涡旋的维持；第二，基流不同，对速率变化的影响程度也不相同。由此看来，频散、涡旋相互作用和环境基流对涡旋强度的变化都可能具有影响能力。

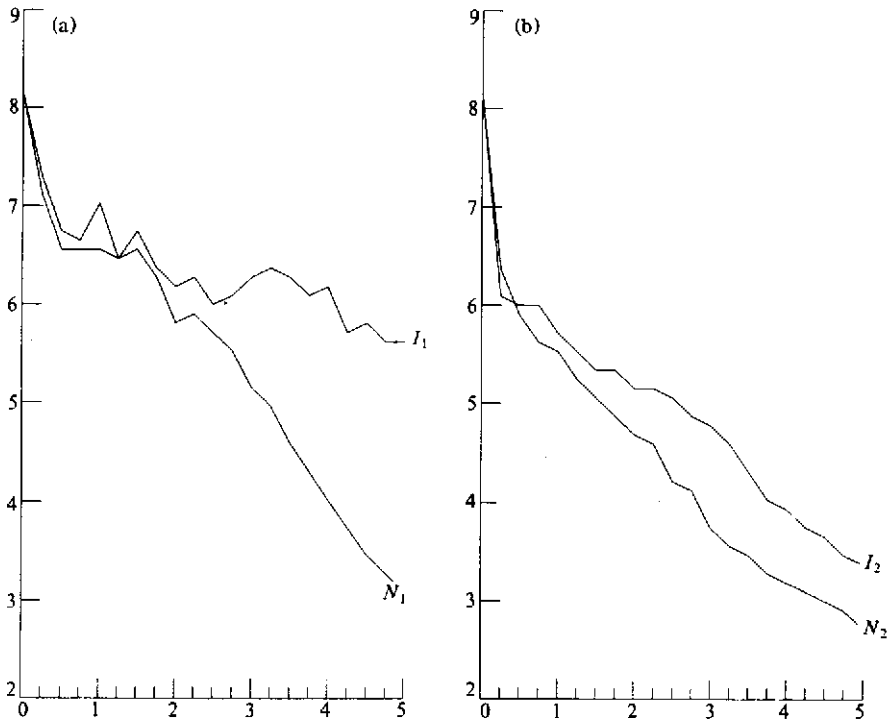


图 1 低压涡旋强度随时间的变化

(a) I 类基流；(b) II 类基流。横坐标为模式日，纵坐标为涡旋强度，单位： $10^{-4} s^{-1}$ ； $N_1$  为试验 1， $I_1$  为试验 2； $N_2$  为试验 3， $I_2$  为试验 4； $N$ 、 $I$  分别代表无、有涡旋作用

3.2 涡旋强度演化的临界点现象

设  $\xi_{1max}(T)$  和  $\xi_{2max}(T)$  分别为试验 1、2 中  $T$  时刻低压涡旋相对涡度的极大值。定

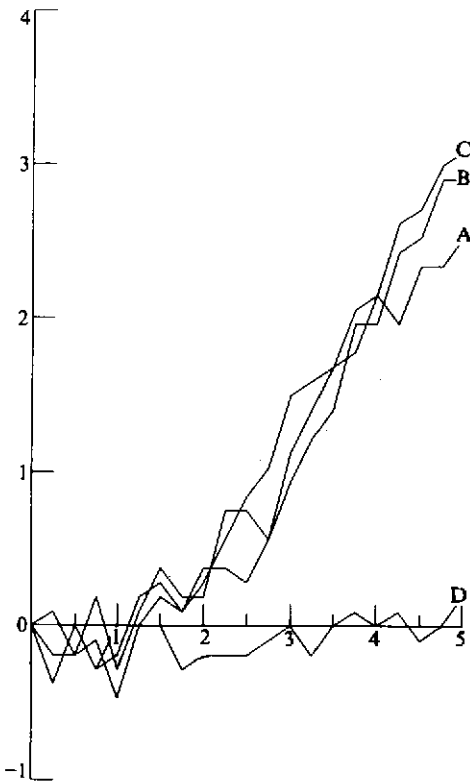


图2 差值 $\Delta\xi_A$ 、 $\Delta\xi_B$ 、 $\Delta\xi_C$ 、 $\Delta\xi_D$ 随时间的变化  
横坐标为模式日, 纵坐标为相对强度  
单位:  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;

曲线A、B、C、D分别代表 $\Delta\xi_A$ 、 $\Delta\xi_B$ 、 $\Delta\xi_C$ 、 $\Delta\xi_D$

2 085、2 451、2 530 km。

试验2与试验8相比, 距离 $d$ 相差840 km, 但相应的差值曲线A、C(图2)两者接近。但是, 试验10与试验8相比, 距离 $d$ 仅相差约80 km, 仅为试验2与试验8距离差值840 km的 $1/10$ 左右, 相应的差值曲线D、C(图2)两者不同, 它们所反映的低压涡旋强度的演化特征也完全不同, 显示出涡旋强度演化过程中的临界点现象。

### 3.3 涡旋相互作用使低压涡旋路径明显改变

涡旋相互作用不仅影响到低压涡旋强度的演化, 而且影响到低压涡旋的移动路径。

无涡旋相互作用时, 受环境基流的引导, 低压涡旋均向东北方向移动(图3a, 0A, 试验1; 图3b, 0B, 试验5; 图3c, 0C, 试验7; 图3d, 0D, 试验9)。

有涡旋相互作用时, 低压涡旋的路径发生明显改变(图3a, 0E, 试验2; 图3b, 0F, 试验6; 图3c, 0G, 试验8; 图3d, 0H, 试验10)。试验2、6、8中低压涡旋的移速显著减慢, 5个模式日期间, 移动范围不超过400 km。若初始位置点O在西北区东部, 低压涡旋可以在5 d内停滞在西北区东部。此外, 试验10中, 低压涡旋的移向、移速均与试验2、8、10不同, 这就显示出涡旋移动特征的临界点现象。

义  $\Delta\xi_A(T) = \xi_{2\max}(T) - \xi_{1\max}(T)$ 。若  $\Delta\xi_A(T)$ 在整个积分时段内均近似为零, 说明涡旋相互作用对低压涡旋强度的演变没有什么影响; 若  $\Delta\xi_A(T)$ 在某个时段明显大于零, 说明涡旋相互作用使低压涡旋强度衰减速率显著减慢。差值 $\Delta\xi_A(T)$ 如图2中曲线A所示。

类似地定义  $\Delta\xi_B(T) = \xi_{6\max}(T) - \xi_{5\max}(T)$ ,  $\xi_C(T) = \xi_{8\max}(T) - \xi_{7\max}(T)$ ,  $\Delta\xi_D(T) = \xi_{10\max}(T) - \xi_{9\max}(T)$ , 这里的 $\xi_{i\max}$ 代表试验 $i$ 中低压涡旋相对强度的极大值( $i=5, 6, 7, 8, 9, 10$ )。试验6、8、10有涡旋相互作用; 试验5、7、9无涡旋相互作用。差值 $\Delta\xi_B$ 、 $\Delta\xi_C$ 、 $\Delta\xi_D$ 随时间的变化如图2曲线B、C、D所示。

显然, 曲线A、B、C的差值随时间增大, 意味着涡旋相互作用使低压涡旋强度衰减速率变慢; 曲线D始终在横坐标轴附近摆动, 意味着涡旋相互作用对低压涡旋强度的演化影响不大。

在图2的4组对比试验中, 除初始场上台风涡旋中心与低压涡旋中心之间的距离取值不同外, 所有试验条件均相同。试验2、6、8、10中, 距离 $d$ 分别等于1611、

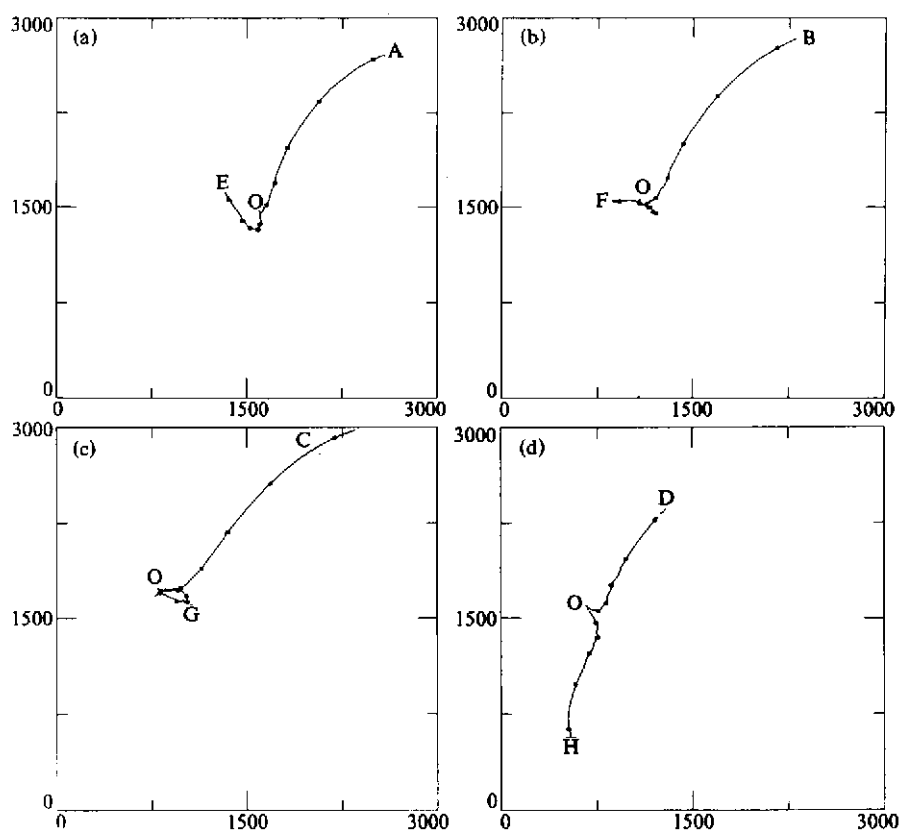


图3 低压涡旋的移动路径

(a) 试验 1、2; (b) 试验 5、6; (c) 试验 7、8; (d) 试验 9、10

0A、0B、0C、0D 无涡旋相互作用; 0E、0F、0G、0H 有涡旋相互作用;

图框数字为公里数, 路径上每隔 1d 标注 1 次

## 4 结束语

近来, 涡旋相互作用及其对台风的影响等问题已受到广泛的注意<sup>[3~7]</sup>。本文分析了一个台风涡旋与一个低压涡旋的相互作用, 这个低压涡旋位于台风涡旋的西北方向, 大致相应于我国西北地区东部的位置, 初步的数值结果显示, 这种相互作用对该低压涡旋的强度演变和移动路径都可能产生影响, 同时还清楚地显示出若干具有非线性特征的现象。进一步的机理问题有待继续研究。

## 参 考 文 献

- 1 Chan, J. C. L. and Williams, R. T., Analytical and numerical studies of the beta effect in tropical cyclone motion, Part 1, *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**, 1257~1265.
- 2 Ohnishi, H., Effect of the vortex structure on nonlinear beta drift, WMO/TD-No. 472, IV, 1991, 43~51.

- 3 Chen Lianshou and Luo Zhexian, Effect of the interaction of different scale vortices on the structure and motion of typhoons, *Adv. Atmos. Sci.*, 1995, **12**(2), 207~214.
- 4 王玉清、朱永昶, 双热带气旋相互作用的机制分析及数值研究 II: 数值模拟, 大气科学, 1992, **16**(6), 659~668.
- 5 胡坚等, SPECTRUM-90期间大气10—20天准周期振荡对热带气旋转向路径的影响, 大气科学, 1994, **18**(5), 520~526.
- 6 徐祥德等, 阻塞结构对近海台风异常路径影响的数值研究, 85-906-07课题组, 台风科学, 业务试验和天气动力学理论的研究(第二分册), 北京: 气象出版社, 1996, 105~109.
- 7 赖碧波、亢迪、陈联寿、徐祥德, 台风与冷涡Bogus方案及其相互作用的数值试验, 85-906-07课题组, 台风科学, 业务试验和天气动力学理论的研究(第二分册), 北京: 气象出版社, 1996, 153~164.

## Interaction Between Two Vortices and Its Effect on the Intensity and Track

Ma Jingxian and Luo Zhexian

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

**Abstract** We studied the interaction between a typhoon and a cyclonic vortex. Results show that the interaction can decrease the rate at which the intensity of the cyclonic vortex decays with time, and increase the time period in which the cyclonic vortex maintains near its initial position. The results also show that in the intensity evolution and the track change of the cyclonic vortex, nonlinear critical point phenomenon appears obviously.

**Key words:** energy dispersion; vortex; nonlinearity; critical point phenomenon