

## 非对称环流的细致结构与台风路径的摆动\*

田永祥

(南京气象学院气象学系, 南京, 210044)

**摘要** 应用准地转三层斜压模式数值模拟热带气旋的移动, 详细分析热带气旋非对称环流的三度空间结构及其与热带气旋移动的关系。结果表明: 非线性涡度平流与线性  $\beta$  项相结合不但可以产生大尺度  $\beta$  涡旋对, 而且还可产生小尺度涡旋对; 这两种不同尺度的非对称涡旋不断相互作用, 导致热带气旋移速的振荡和移向的摆动。

**关键词** 热带气旋,  $\beta$  涡旋对, 小涡旋对, 结构, 摆动

**分类号** P444

80 年代中期, 陈联寿<sup>[1]</sup>指出: 台风结构是影响台风移动的一个重要因子。后来, 关于台风结构和移动有一系列的数值试验结果<sup>[2~6]</sup>和评述<sup>[7]</sup>问世。应特别指出的是, Fiorino 和 Elsberry<sup>[3]</sup>在准地转正压的框架内研究了非对称流场中大尺度  $\beta$  涡旋对的水平结构对热带气旋移动的影响, 这一工作受到了广泛的重视。在他们研究工作的基础上, 本文应用一个准地转三层斜压模式, 数值模拟热带气旋的移动, 分析非对称环流三度空间的细致结构及其与热带气旋移动的关系。

### 1 模式概述

设  $p_0=100\text{hPa}$ 、 $p_6=100\text{hPa}$  分别为模式大气的上、下边界。把模式大气垂直等分为 3 个分离的层次, 气压间隔  $\Delta p$  为  $300\text{hPa}$ 。把准地转涡度方程应用于第 1、3 和 5 模式层上, 把绝热热力学方程应用于第 2、4 模式层上。在无基本气流的假定下, 导出准地转三层斜压模式的基本方程组<sup>[6]</sup>为

$$\frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \psi_k = -J(\psi_k, \nabla^2 \psi_k) - \beta \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \frac{f_0}{\Delta p} (\omega_{k+1} - \omega_{k-1}) \quad (k = 1, 3, 5) \quad (1)$$

$$\nabla^2 \omega_k - \frac{f_0^2}{\sigma_k (\Delta p)^2} (2\omega_k - \omega_l) = \frac{f_0}{\sigma_k \Delta p} \{ -J(\psi_{k-1}, \nabla^2 \psi_{k-1}) + J(\psi_{k+1}, \nabla^2 \psi_{k+1}) - \beta \left( \frac{\partial \psi_{k-1}}{\partial x} - \frac{\partial \psi_{k+1}}{\partial x} \right) + \nabla^2 [J(\psi_k, \psi_{k-1} - \psi_{k+1})] \} \quad (k = 2, 4) \quad (2)$$

式中扰动流函数  $\psi_k$  (以后简称流函数) 和垂直速度  $\omega_k$  为因变量, 这里规定  $k=2, \omega_l = \omega_{k+2}; k=4, \omega_l = \omega_{k-2}$ 。关于模式的计算区域、初始条件、边界条件以及模式参数的选取等, 请参阅文献[6]。

方程(1)、(2)中的雅可比项采用 Arakawa(1966)设计的有限差分格式计算。应用超张弛迭

\* 国家“八五”科技攻关 85-906-07-02-04 资助项目  
收稿日期: 1993-08-24; 改回日期: 1993-11-06

代法求解该方程组,空间步长取为 50km,时间步长取为 10min,总积分时间为 4 个模式日。在数值计算过程中,总流函数  $\psi_k(x, y, t)$  被分解为(轴)对称的分量  $\psi_{ks}(x, y, t)$  和非对称的分量  $\psi_{ka}(x, y, t)$ <sup>[6]</sup>,并计算非对称流函数场中大尺度反气旋性、气旋性  $\beta$  涡旋之间的准均匀流。因 Fiorino 等人<sup>[3]</sup>提出的计算准均匀流的方法不能充分地考虑小尺度涡旋对热带气旋移动的影响。因此,我们提出了一种改进的方法,首先,选取围绕热带气旋中心半径为  $r=250\text{km}$  的圆形区域  $A_k$ ,根据

$$u_{ka} = -\frac{\partial \psi_{ka}}{\partial y}; \quad v_{ka} = \frac{\partial \psi_{ka}}{\partial x} \quad (3)$$

由  $\psi_{ka}(x, y, t)$  计算区域  $A_k$  内所有模式网格点上的非对称风速分量。其次,在区域  $A_k$  内分别求出  $u_{ka}(x, y, t)$  和  $v_{ka}(x, y, t)$  的平均值,得到  $\bar{u}_{ka}(t)$  和  $\bar{v}_{ka}(t)$ 。最后,根据

$$\bar{V}_{ka}(t) = \sqrt{\bar{u}_{ka}^2(t) + \bar{v}_{ka}^2(t)} \quad (4)$$

$$\bar{\theta}_{ka}(t) = \text{tg}^{-1}[\bar{v}_{ka}(t)/\bar{u}_{ka}(t)] \quad (5)$$

分别计算出准均匀流的平均速度  $\bar{V}_{ka}(t)$  和平均方向  $\bar{\theta}_{ka}(t)$ 。

上述的计算准均匀流的方法与 Fiorino 等人的计算方法的实质区别在于,它是在区域  $A_k$  内计算非对称风速  $V_{ka}(x, y, t)$  的矢量平均值,而不是代数平均值。用这种改进的方法计算的准均匀流能够充分地考虑热带气旋中心附近的小尺度涡旋气流对准均匀流的贡献。

## 2 数值试验结果

从初始圆对称的涡旋<sup>[6]</sup>启动,数值积分模式方程组(1)、(2)4 个模式日。图 1 给出了第 60 个模式小时各模式层非对称流函数的分布。由于涡度方程(1)中的非线性涡度平流与线性  $\beta$  项的相互作用,在非对称流场中,不但产生了大尺度  $\beta$  涡旋对,而且还产生了小尺度涡旋对。小尺度涡旋的水平尺度为 100~300km,它的强度可与大尺度  $\beta$  涡旋的强度相比拟。小尺度涡旋对的相互位置配置一般与大尺度  $\beta$  涡旋对的刚好相反,即小尺度气旋性(反气旋性)涡旋常位于热带气旋中心的东(西)部。

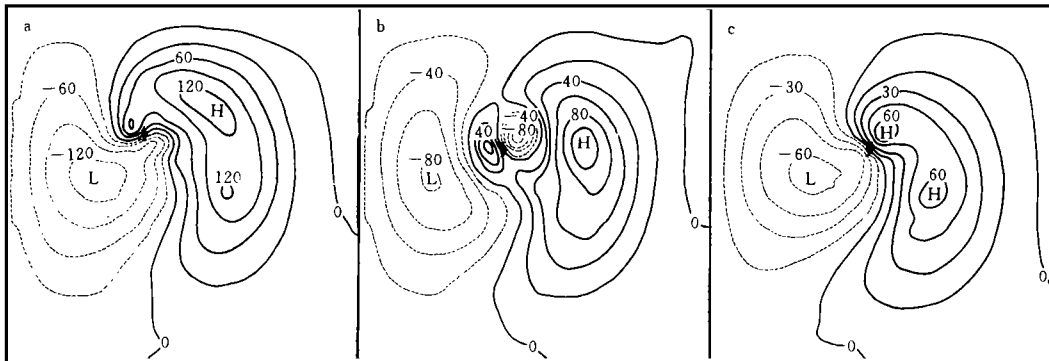


图 1 第 60 个模式小时非对称流函数分量  $\psi_a$  a. 250hPa, b. 550hPa, c. 850hPa

其等值线间隔分别为  $30 \times 10^4$ 、 $20 \times 10^4$ 、 $15 \times 10^4 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

小尺度涡旋的存在已为 Marks 等人<sup>[8]</sup>的观测所证实。1984 年 9 月 24~25 日, Marks 等人应用装备有机载多卜勒雷达的探测飞机对发生在北太平洋东部的飓风 Norbert 进行了连续的探测,获得了完整的三维风场资料。他们把水平风分解为水平平均风和扰动风,并把扰动风又

分解为(轴)对称的与非对称的扰动风。分析结果表明,在 3km 以上的各高度,非对称扰动风场都具有一涡旋耦合特征;气旋性、反气旋性小涡旋分别位于飓风的左前象限和右后象限。在 9km 的高度上,两小涡旋中心相距约为 50km(如图 2 所示)。

## 2.1 非对称环流的空间结构

参见图 1 和表 1,大尺度  $\beta$  涡旋随高度的增加而加强,两  $\beta$  涡旋中心之间的距离  $d_i$  也随高度变化。由大尺度反气旋性  $\beta$  涡旋中心到气旋性  $\beta$  涡旋中心的连线与  $x$  轴的交角  $\alpha_i$  随高度的增加而加大。

表 1 第 60 个模式小时非对称涡旋的空间结构

$P/hPa$	大尺度 $\beta$ 涡旋				小尺度涡旋			
	$(\psi_{\beta i})_{\min}$	$(\psi_{\beta i})_{\max}$	$d_i/km$	$\alpha_i/(\circ)$	$(\psi_{\beta i})_{\min}$	$(\psi_{\beta i})_{\max}$	$d_i/km$	$\alpha_i/(\circ)$
250	-134	137	949	30.2	-109	96	180	146.3
550	-82	113	1101	15.3	-88	74	200	201.9
850	-65	66	850	-8.1	无	67		

\* 大尺度  $\beta$  涡旋、小尺度涡旋的强度  $\psi_{\beta i}$ 、 $\psi_{\beta i}$  的单位均为  $10^4 m^2 \cdot s^{-1}$

小尺度涡旋以小涡旋对、小槽小脊或只有气旋性、反气旋性小涡旋等多种形式出现。小尺度涡旋也随高度的增加而加强。两小涡旋中心之间的距离  $d_i$  随高度略有变化。由反气旋性小涡旋中心到气旋性小涡旋中心的连线与  $x$  轴的交角  $\alpha_i$  随高度变化很大。从 550hPa 到 250hPa,  $\alpha_i$  减小了  $55.6^\circ$ 。

## 2.2 非对称环流随时间的变化

以 550hPa 的非对称环流为例讨论其随时间的变化。大尺度气旋性  $\beta$  涡旋的总趋势是随时间加强的,但呈明显的波动式变化。在第 30~31、51~52、59~60、76~77、83~84 模式小时,大尺度气旋性  $\beta$  涡旋都突然减弱。其最大减弱率出现在第 76~77 模式小时,它的值为  $-32 \times 10^4 m^2 \cdot s^{-1} \cdot h^{-1}$ (参见图 3)。

距离  $d_i$  随时间的变化(图略)与大尺度  $\beta$  涡旋的强度密切相关。当气旋性  $\beta$  涡旋加强时,  $d_i$  减小;当气旋性  $\beta$  涡旋减弱时,  $d_i$  增大。  $d_i$  的最大变化率出现在第 30~31 模式小时,其值为  $316 km \cdot h^{-1}$ 。交角  $\alpha_i$  的最大变化率也出现在第 30~31 模式小时,其值为  $-31.2^\circ h^{-1}$ (图略)。  $\alpha_i$  的增大或减小意味着大尺度  $\beta$  涡旋对绕热带气旋中心作逆时针或顺时针的旋转。

在非对称环流演变的过程中,当大尺度  $\beta$  涡旋突然减弱时,小尺度涡旋新生发展;当大尺度  $\beta$  涡旋发展强盛时,小尺度涡旋减弱消失。一般而言,从大尺度气旋性  $\beta$  涡旋强度的“波谷”到“波峰”有一次小尺度涡旋活动过程。在 4 个模式日中,约有 6 次小尺度涡旋活动过程(图 3)。小涡旋活动的周期最短只有几小时,最长达 26h。距离  $d_i$  变化于 150~350km 之间(图略),交角  $\alpha_i$  的最大变化率出现在 59~60 模式小时,其值为  $122.8^\circ h^{-1}$ (图略)。850hPa 和 250hPa 的

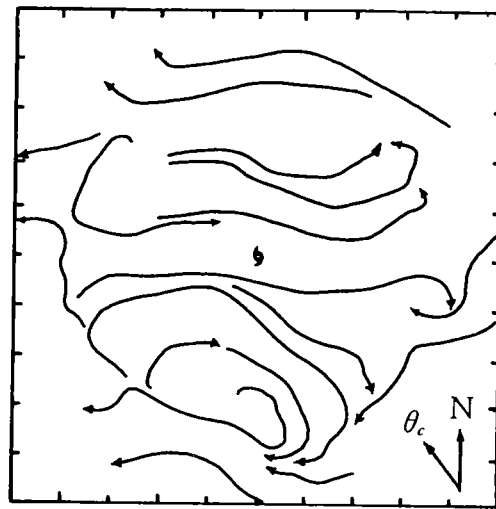


图 2 飓风 Norbert 9km 高度上的非对称扰动流场(流线) 图中  $\theta_c$  表示飓风的移向, 图框上刻度的间隔为 8.25km

非对称环流随时间变化的特征与 550hPa 的相似，不再赘述。

### 2.3 准均匀流与热带气旋移动的关系

同样地，以 550hPa 的准均匀流和热带气旋移动为例讨论其两者的关系。

参见图 4、图 5，用改进方法计算的 550hPa 准均匀流平均速度  $\bar{V}_a$  和热带气旋移速  $V_c$  都随时间呈明显的振荡，而且两者密切相关。在 4 个模式日中，热带气旋的移动有 4 次加速和 4 次减速过程，它们都可以由  $\bar{V}_a$  的变化反映出来。可以说，是准均匀流平均速度控制着热带气旋移速。

参见图 4、图 6，用改进方法计算的 550hPa 准均匀流平均方向  $\bar{\theta}_a$  和热带气旋移向  $\theta_c$  都随时间呈明显的摆动，而且两者也存在相关。在 4 个模式日中，热带气旋有两次明显的转向(摆动)过程。第一次发生在第 37~38 模式小时，热带气旋由向偏西方向折向偏东方向移动(见图 4、图 6、表 2)，其移速明显减慢(图 5)。在热带气旋转向之前的第 31 个模式小时，大尺度气旋性  $\beta$  涡旋迅速减弱，小尺度气旋性涡旋突然加强(图 3)。随后，准均匀流平均方向超前地由偏西方向逐渐转向东北偏北方向，准均匀流平均速度也明显减小。这期间，热带气旋一般在准均匀流平均方向的左侧移动(图 6)，即有  $(\bar{\theta}_a - \theta_c) > 0$ ，而且这一方向的偏差随时间而增大(表 2)。第二次发生在第 54~65 模式小时，热带气旋由向西北偏西方向转向东北偏北方向移动(图 4、图 6、表 2)，其移速也明显减慢(图 5)。在这期间的第 61~62 模式小时，热带气旋由向西北方向迅速转向偏北方向移动。然而在第 60 个模式小时，大尺度气旋性  $\beta$  涡旋迅速减弱，小尺度涡旋突然加强(图 1b、图 3)，准均匀流平均方向也超前地由偏北方向转向偏东方向，准均匀流平均速度也明显减小。在迅速转向之前的第 54~60 模式小时，热带气旋也在准均匀流平均方向的左侧移动(图 6)，即有  $(\bar{\theta}_a - \theta_c) > 0$ ，而且这一差值也随时间而增大(表 2)。850hPa 和 250hPa 准均匀流与热带气旋的移动也存在着密切的相关。

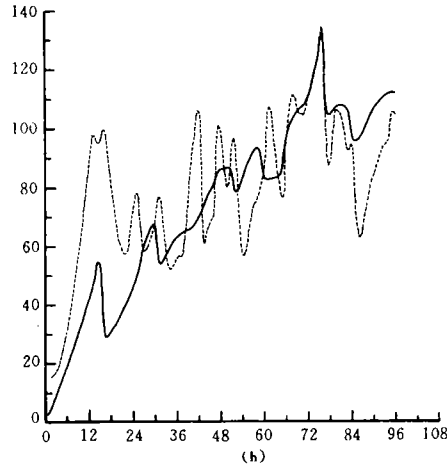


图 3 550hPa 大尺度气旋性  $\beta$  涡旋强度  $|(\varphi_{\beta})_{ms}|$  (实线)和小尺度气旋性涡旋强度  $|(\varphi_{\beta})_{ms}|$  (断线)随时间的变化(单位:  $10^4 m^2 \cdot s^{-1}$ )

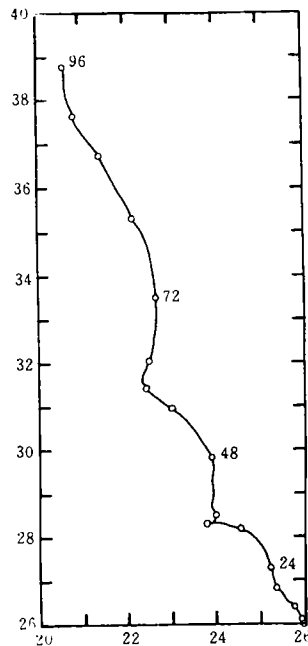


图 4 550hPa 热带气旋移动的路径沿路径的标号的时间间隔为 6h，图框上刻度的间隔为 50km

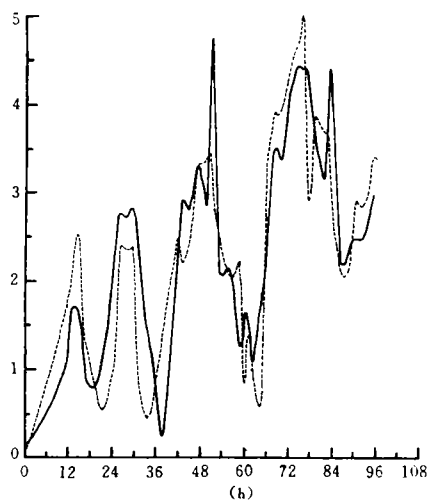


图 5 550hPa 准均匀流平均速度  $\bar{V}_a$ (断线)和热带气旋移速  $V_c$ (实线)随时间的变化(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

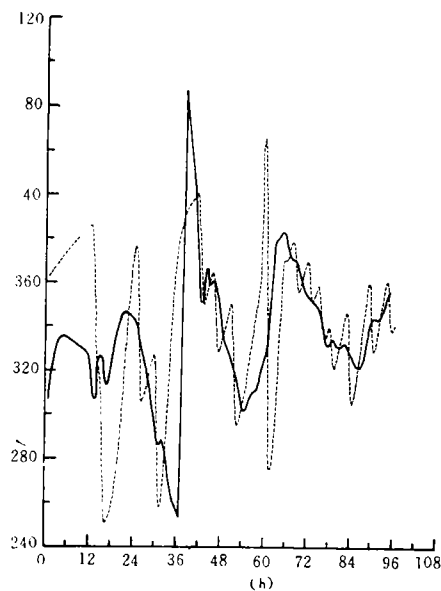


图 6 550hPa 准均匀流平均方向  $\bar{\theta}_a$ (断线)和热带气旋移向  $\theta_c$ (实线)随时间的变化(单位:  $^\circ$ )

表 2 550hPa 准均匀流平均方向  $\bar{\theta}_a$  和热带气旋移向  $\theta_c$ (单位:  $^\circ$ )

$t$ (模式小时)	$\bar{\theta}_a$	$\theta_c$	$\bar{\theta}_a - \theta_c$	$t$ (模式小时)	$\bar{\theta}_a$	$\theta_c$	$\bar{\theta}_a - \theta_c$
30	332.2	292.0	40.2	52	292.5	319.4	-29.6
31	253.1	286.6	-33.5	53	298.6	310.2	-11.6
32	264.2	289.8	-25.6	54	306.1	301.6	4.5
33	287.5	280.1	7.4	55	316.0	303.1	12.9
34	327.4	268.4	59.0	56	328.1	308.7	19.4
35	359.2	361.2	98.0	57	341.2	311.2	30.0
36	15.7	257.6	118.1	58	353.8	311.2	42.6
37	25.0	250.0	125.0	59	4.9	322.2	42.7
38	31.1	98.6	-67.5	60	98.1	327.0	131.1
39	35.2	72.9	-37.7	61	270.1	330.5	-60.4
40	38.0	55.6	-17.6	62	278.6	2.2	-83.6
41	40.1	39.6	0.5	63	295.3	20.0	-84.7
42	42.1	351.8	50.3	64	329.0	21.4	-52.4
43	346.6	350.1	-3.5	65	13.0	25.2	-12.2

### 3 结 论

综上所述,我们可以得到以下几点初步的结论。

(1)用准地转三层斜压模式模拟热带气旋的移动,由于涡度方程中的非线性涡度平流与线性  $\beta$  项的相互作用,在热带气旋的非对称流场中,不但产生了大尺度  $\beta$  涡旋对,而且还产生了小尺度涡旋对。

(2)从大尺度气旋性 $\beta$ 涡旋强度的“波谷”到“波峰”一般有一次小尺度涡旋活动过程。大尺度 $\beta$ 涡旋与小尺度涡旋不断相互作用。当大尺度 $\beta$ 涡旋突然减弱时,小尺度涡旋新生发展;当大尺度 $\beta$ 涡旋发展强盛时,小尺度涡旋减弱消失。

(3)斜压热带气旋的移速随时间呈明显的振荡。当大尺度气旋性 $\beta$ 涡旋较强(弱)、小尺度涡旋相对较弱(强)时,准均匀流平均速度较大(小),相应地,热带气旋作加(减)速移动。

(4)斜压热带气旋的移向随时间呈明显的摆动。当大尺度气旋性 $\beta$ 涡旋突然减弱、小尺度气旋性涡旋迅速加强时,准均匀流平均方向由偏西方向转向东北或偏东方向。紧接着,热带气旋作相应的转向运动。

**致谢:**曾与罗哲贤教授进行过多次讨论,得到他的热情指导和帮助,在此谨表示诚挚的谢意。

### 参 考 文 献

- 1 陈联寿. 热带气旋运动研究和业务预报的现状和发展. 见: 全国台风科研协作技术组, 上海台风研究所主编. 台风会议文集. 北京: 气象出版社, 1985. 6~30
- 2 Chan Johnny C L, Williams R T. Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion, Part I: zero mean flow. *J Atmos Sci.*, 1987, 44(9): 1257~1265
- 3 Fiorino Michael, Elsberry Russell L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J Atmos Sci.*, 1989, 46(7): 975~990
- 4 李天明, 朱永祥. 热带气旋运动的分析和模拟 I: 非轴对称结构和路径突变. *中国科学 B 辑*, 1990, (1): 104~112
- 5 罗哲贤. 热带气旋逆时针打转异常路径的可能原因. *中国科学 B 辑*, 1991, (7): 769~775
- 6 Tian Yongxiang (田永祥), Luo Zhexian (罗哲贤). Vertical structure of beta gyres and its effect on tropical cyclone motion. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1994, 11(1): 43~50
- 7 董克勤. 热带气旋移动研究评述. *热带气象*, 1987, 3(4): 356~363
- 8 Marks Jr Frank D, Houze Jr Robert A, Gamache John F. Dual-aircraft investigation of the inner-core of hurricane norbert, Part I: kinematic structure. *J Atmos Sci.*, 1992, 49(11): 919~942

## THE FINE STRUCTURE OF ASYMMETRIC CIRCULATION AND VACILLATION IN TYPHOON TRACK

Tian Yongxiang

(Department of Meteorology, NIM, 210044, Nanjing, PRC)

**Abstract** Tropical cyclone motion is numerically simulated in the context of a quasi-geostrophic three-layer baroclinic model with detailed analysis of an asymmetric circulation and its relation to the cyclone motion. Results show that combination of the linear beta term and nonlinear vorticity advection produces gyres both of large and small scales and that the steady interaction between these pairs will lead to the oscillation in speed and vacillation in direction for a tropical cyclone.

**Keywords** tropical cyclone, beta gyres, small scale gyres, structure, vacillation