

热带气旋逆时针打转物理机制的研究*

田永祥

(南京气象学院气象学系, 南京 210044)

摘要 应用一个无基本气流的准地转斜压模式数值模拟热带气旋逆时针打转运动。

分析结果表明: 对称气流对非对称涡度的平流引起非对称流场中的小尺度涡旋和通风气流逆时针旋转; 旋转的通风气流引导热带气旋作逆时针打转运动。

关键词 热带气旋, 打转, 涡度平流, 小尺度涡旋, 通风气流

分类号 P435

陈联寿(1985)^[1]曾指出: 热带气旋预报的最严重误差往往由于移动路径的突变所引起, 加强对热带气旋运动突变问题的研究乃是当务之急。目前, 热带气旋移动物理机制的研究已经成为一个重要的前沿课题^[2]。Chan et al. (1987)^[3]、Fiorino et al. (1989)^[4]以及李天明等(1990)^[5]应用数值试验的方法成功地模拟出热带气旋向西北方向的移动, 并复制了蛇行异常路径的运动形态。

罗哲贤(1991)^[6]应用一个带有环境热源强迫和耗散的准地转正压模式研究了热带气旋逆时针打转的原因, 并指出这种异常路径是在线性 β 效应、非线性涡度平流、以及环境加热强迫和耗散的共同作用下形成的。

本文应用一个无基本气流的准地转三层斜压模式数值模拟热带气旋逆时针打转运动, 并进一步分析其物理机制。

1 模式概述

取模式大气上界 $p_0 = 100\text{hPa}$ 、下界 $p_6 = 1000\text{hPa}$ 。把模式大气垂直等分为3个分离的层次, 气压间隔 Δp 为 300hPa 。在 p_0 、 p_6 处取 p 坐标垂直速度 ω_0 、 ω_6 为零。把准地转涡度方程写在第1、3和5模式层上, 把绝热的热力学方程应用于第2、4模式层上。在基本气流为零的假定下, 由这些方程导出准地转三层斜压模式的基本方程组^[7]为

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

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

式中扰动流函数 ψ_k (以后简称流函数) 和垂直速度 ω_k 为因变量。这里规定 $k = 2, \omega_l = \omega_{k+2}$;

* 国家“八五”科技攻关 85-906-07-02-04 项目资助

收稿日期: 1994-03-01; 改回日期: 1995-02-10

$k = 4, \omega_t = \omega_{k-2}$ 。

在第 3 模式层(即 550hPa),热带气旋的初始涡度场^[3]取为

$$\zeta_3(r) = \frac{2V_m}{r_m} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \right] \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \right] \right\} \quad (3)$$

式中 $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, (x_0, y_0) 为热带气旋中心的坐标, V_m 为最大风速, r_m 为最大风速半径, 而 b 为涡旋形状参数。在本试验中, 取 $r_m = 100\text{km}$, $V_m = 25\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $b = 1$ 。根据 $\zeta_3(x, y)$ 的分布求解泊松方程 $\nabla^2 \psi_3(x, y) = \zeta_3(x, y)$, 得到初始流函数场 $\psi_3(x, y)$ 。参考 Kitade(1980)^[8] 给出的热带气旋流函数垂直分布廓线, 指定第 1 模式层(250hPa)和第 5 模式层(850hPa)的初始流函数场分别为

$$\psi_1(x, y) = C_1 \psi_3(x, y), \quad \psi_5(x, y) = C_5 \psi_3(x, y) \quad (4)$$

式中 $C_1 = 0.56, C_5 = 1.44$ 。

关于模式的数值计算区域和水平侧边界条件等请参阅文献[7]。

模式方程(1)、(2)中的雅可比项采用 Arakawa(1966)设计的有限差分格式计算。应用超张弛迭代法数值求解该方程组。空间步长取 50km, 时间步长取 10min, 总积分时间为 4 个模式日。

在数值积分过程中, 应用二次曲面拟合方法订正, 得到每小时的热带气旋中心位置, 分解总流函数 $\psi_i(x, y, t)$ 为轴对称的分量 $\psi_{is}(x, y, t)$ 和非轴对称的分量 $\psi_{ia}(x, y, t)$; 计算非对称流函数场中的通风气流^[7,9]。

2 热带气旋逆时针打转的物理机制

2.1 热带气旋逆时针打转的现象

从初始圆对称的涡旋(3)、(4)启动, 数值积分模式方程组(1)、(2)4 个模式日。图 1 给出了 850hPa 热带气旋的路径。由图中可见, 热带气旋起初向西北方向移动。在第 22~31h 期间, 热带气旋先后转向偏西、西南、偏南、东、东北和偏北方向移动, 经历了一个逆时针打转运动过程(表 1)。热带气旋逆时针打转的时间尺度约为 10h, 空间尺度约为 20km。在热带气旋逆时针打转期间, 其移速明显减慢(表 1)。这与实际大气中热带气旋逆时针打转的情形是一致的。在第 37、第 50h 前后, 热带气旋有两次由向偏西方向折向偏北方向的转向运动过程。

2.2 热带气旋逆时针打转的机理分析

为了更加清楚地了解热带气旋逆时针打转的物理机制, 我们进行流函数倾向分析^[4]。对于第 5 模式层(850hPa), 模式方程(1)可改写成

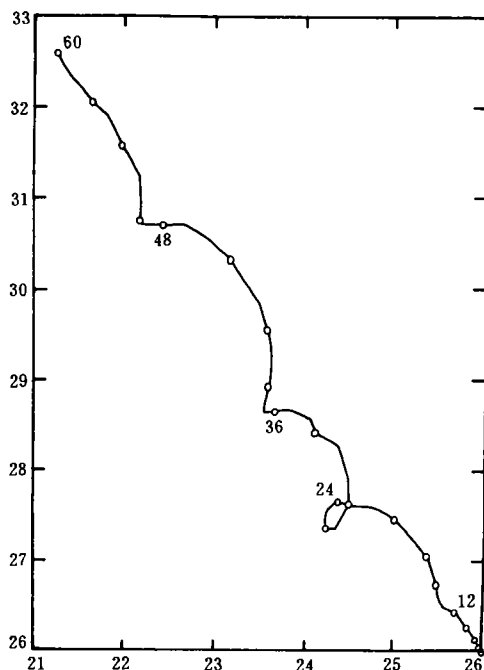


图 1 850hPa 热带气旋的路径

沿路径的标号的时间间隔为 3h;

图框上刻度的间隔为 50km

Fig. 1 The 850 hPa tropical cyclone's path, with marks on the track denoting a 3h interval and ticks on the frame 50km

表 1 850hPa 热带气旋的移向 θ_c , 移速 V_c 和通风气流平均方向 $\bar{\theta}_a$, 平均速度 $\bar{V}_a$ 随时间的变化

Table 1 The 850 hPa tropical cyclone's hourly calculations of the direction θ_c , velocity V_c , and the mean direction $\bar{\theta}_a$ and mean velocity $\bar{V}_a$ of the ventilation flow

t/h	$\bar{\theta}_a/(^\circ)$	$\theta_c/(^\circ)$	$\bar{\theta}_a - \theta_c$	$\bar{V}_a/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_c/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{V}_a - V_c$
22	298	290	8	2.9	3.0	-0.1
23	303	281	22	2.8	3.1	-0.3
24	252	266	-14	2.3	2.3	0.0
25	256	217	39	2.0	1.7	0.3
26	108	186	-78	0.7	1.6	-0.9
27	90	135	-45	0.9	1.0	-0.1
28	79	45	34	1.1	2.2	-1.1
29	292	30	-98	1.1	2.2	-1.1
30	346	6	-20	3.3	2.3	1.0
31	350	350	0	3.5	4.5	-1.0

$$\frac{\partial \psi_5}{\partial t} = H^{-1}[-J(\psi_5, \nabla^2 \psi_5)] + H^{-1}[-\beta \frac{\partial \psi_5}{\partial x}] + H^{-1}[\frac{f_0}{\Delta p}(\omega_6 - \omega_4)] \quad (5)$$

式中 $H^{-1}[F]$ 是 $\nabla^2(\frac{\partial \psi_5}{\partial t}) = F$ 的求逆运算。将 $\psi_5 = \psi_{5s} + \psi_{5a}$ 代入(5)式,得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_5}{\partial t} = & H^{-1}[-J(\psi_{5s}, \nabla^2 \psi_{5a})] + H^{-1}[-J(\psi_{5a}, \nabla^2 \psi_{5s})] + H^{-1}[-\beta \frac{\partial \psi_{5s}}{\partial x}] \\ & + H^{-1}[-\beta \frac{\partial \psi_{5a}}{\partial x}] + H^{-1}[\frac{f_0}{\Delta p}(\omega_6 - \omega_4)] \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式右端各项依次为对称气流对非对称涡度的平流(简称 AAVS)、非对称气流对对称涡度的平流(简称 ASVA)、 β 项的对称分量(简称 SB)、 β 项的非对称分量(简称 AB)、辐散项(或斜压项)所产生的流函数倾向。应当指出, $J(\psi_{5s}, \nabla^2 \psi_{5s}) = 0$, $J(\psi_{5a}, \nabla^2 \psi_{5a})$ 分别比 $J(\psi_{5s}, \nabla^2 \psi_{5a})$, $J(\psi_{5a}, \nabla^2 \psi_{5s})$ 小一个数量级,因而略去不计。

图 2 和图 3 分别给出了 850hPa 非对称流函数和由 AAVS 引起的流函数倾向随时间的变化。由图 2 可见,在 850hPa 的非对称流函数场中,不但有大尺度 β 涡旋,而且还有小尺度涡旋。大尺度气旋性、反气旋性 β 涡旋一般分别位于热带气旋中心以西、以东,两 β 涡旋中心之间的距离 d_1 约为 1000km。小尺度涡旋位于热带气旋中心附近,气旋性、反气旋性小涡旋中心之间的距离 d_2 为 150~300km(表 2),小尺度涡旋绕热带气旋中心不断地作逆时针旋转。关于大尺度 β 涡旋和小尺度涡旋形成的物理机制,请参阅文献[4]和[注]*。

定义:由反气旋性小涡旋中心到气旋性小涡旋中心的连线与 x 轴的交角为 α_s ,两小涡旋中心之间的距离为 d_s ;由对称气流对非对称涡度的平流产生的正的流函数倾向中心到负的流函数倾向中心的连线与 x 轴的交角为 α_t ,两流函数倾向中心之间的距离为 d_t 。

* 田永祥. 小尺度涡旋的形成及其对热带气旋移动的影响. 应用气象学报,即将发表

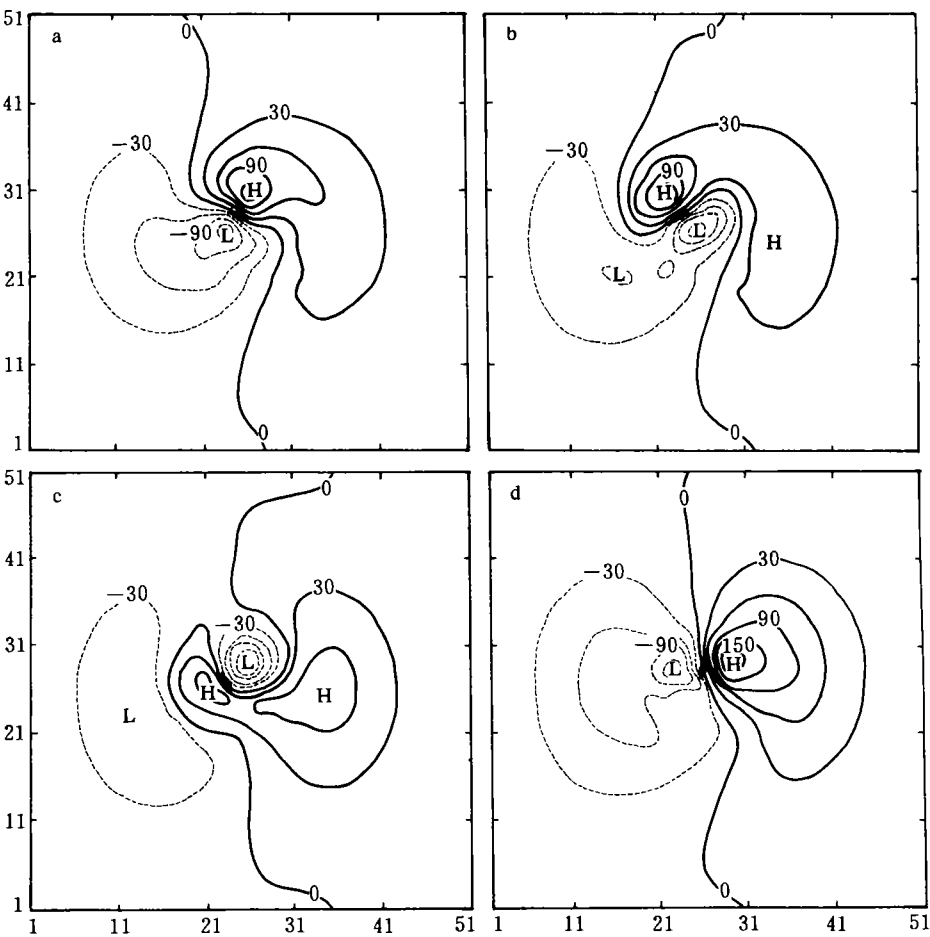


图 2 850hPa 非对称流函数 ψ_{85}

a、b、c 和 d 分别对应 $t = 23、25、27$ 和 $30h$ ； 其等值线间隔均为 $30 \times 10^4 m^2 \cdot s^{-1}$ ； 图框上刻度的间隔为 $500km$

Fig. 2 850 hPa asymmetric streamfunction ψ_{85} with a) – d) corresponding to $t = 20, 25, 27$ and $30 h$, for all of which the contour interval is $30 \times 10^4 m^2 \cdot s^{-1}$ and the ticks on the frame denote $500 km$ each

表 2 α_s, α_t, d_s 和 d_t 随时间的变化

Table 2 Hourly calculations of α_s, α_t, d_s and d_t

t/h	$\alpha_s(^{\circ})$	$\alpha_t(^{\circ})$	$\alpha_t - \alpha_s$	d_s	d_t
22	66	157	91	292	228
23	59	141	82	248	203
24	129	225	96	272	222
25	125	210	85	228	212
26	232	310	78	237	243
27	219	320	101	268	234
28	222	325	103	243	211
29	159	245	86	159	183
30	5	104	99	306	208
31	12	67	55	318	255

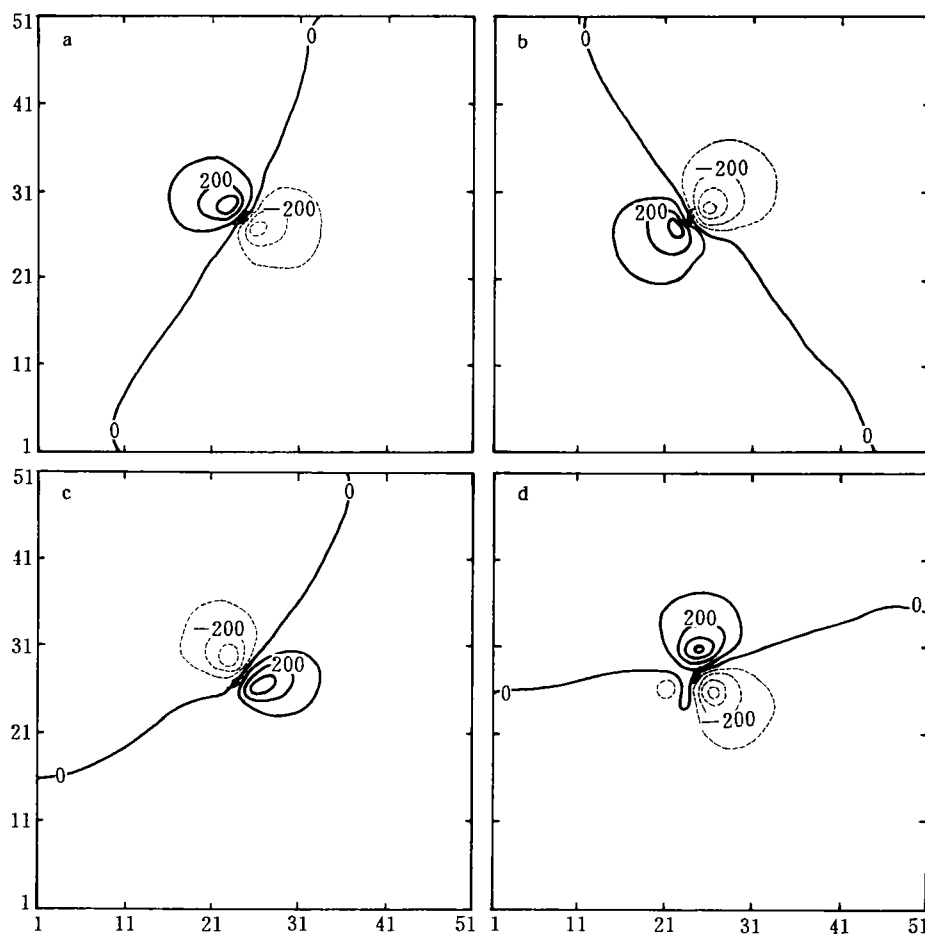


图 3 由 AAVS 引起的 850hPa 流函数倾向

a、b、c 和 d 分别对应 $t = 23, 25, 27$ 和 30h ; 其等值线间隔均为

$10^2 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; 图框上刻度的间隔为 500km

Fig. 3 AAVS-caused 850 hPa streamfunction tendency with contour spaced at $10^2 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Otherwise as in Fig. 2

参见图 2a, 在第 23 小时, 小尺度涡旋与大尺度 β 涡旋重合在一起, $\alpha_s = 59^\circ$, $d_s = 248\text{km}$ (表 2)。通风气流的平均方向 $\bar{\theta}_a = 303^\circ$, 指向西北偏西, 平均速度 $\bar{V}_a = 2.8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 1)。这时, 热带气旋以接近于 $\bar{V}_a$ 的速度 V_c ($V_c = 3.1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 沿 $\bar{\theta}_a$ 的左侧方向 θ_c ($\theta_c = 281^\circ$) 向偏西方向移动。在该时刻, 由于以热带气旋中心为圆心的轴对称气流平流非对称涡度, 在热带气旋中心的西北、东南方向分别有正的、负的流函数倾向中心 (图 3a)。由表 2 可见, $\alpha_t = 141^\circ$, 它超前于 $\alpha_s 82^\circ$, 即相当于 $1/4$ 个方位波长。 $d_t = 203\text{km}$, 它的大小与 d_s 相近。

参见图 2b, 在第 25 小时, 在原正的、负的流函数倾向中心处分别形成反气旋性、气旋性小尺度涡旋, $\alpha_s = 125^\circ$ 。在 2h 内, 小尺度涡旋绕热带气旋中心逆时针旋转了 66° 。小尺度涡旋逆时针的旋转导致通风气流逆时针旋转。这时, 通风气流的平均方向 $\bar{\theta}_a = 256^\circ$, 指向西南偏西。

在 2h 内, θ_a 逆时针旋转了 47° 。通风气流的平均速度减小, $\bar{V}_a = 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。热带气旋沿 θ_a 的左侧方向 θ_c ($\theta_c = 217^\circ$) 向偏南方向减速移动。在 2h 内, 热带气旋的移向逆时针旋转了 64° 。在该时刻, 由于 AAVS 的作用, 在热带气旋中心西南、东北方向分别出现正的、负的流函数倾向中心(图 3b)。由表 2 可见, $\alpha_i = 210^\circ$, 它仍超前于 α_s $1/4$ 个方位波长。

参见图 2c, 在第 27 小时, 由于 AAVS 产生的流函数倾向, 小尺度涡旋加速逆时针旋转, $\alpha_s = 219^\circ$ 。相应地, 通风气流也加速逆时针旋转, $\theta_a = 90^\circ$, 指向东。通风气流的平均速度继续减小。这时, 热带气旋沿 θ_a 的右侧方向 θ_c ($\theta_c = 135^\circ$) 向东南方向减速移动 ($V_c = 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。在 2h 内, 热带气旋的移向逆时针旋转了 82° 。在该时刻, 由于 AAVS 的作用, 在热带气旋中心的东南、西北方向分别有正的、负的流函数倾向中心(图 3c)。由表 2 可见, $\alpha_i = 320^\circ$, 它仍超前于 α_s $1/4$ 个方位波长。

参见图 2d, 在第 30 小时, 由于 AAVS 产生的流函数倾向, 小尺度涡旋继续逆时针旋转, $\alpha_s = 5^\circ$ 。这时, 小尺度涡旋又与大尺度 β 涡旋相重合, 非对称环流的形势与第 23 小时的相似。通风气流减速逆时针旋转, $\theta_a = 346^\circ$ 。通风气流的平均速度明显增加, $\bar{V}_a = 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相应地, 热带气旋沿 θ_a 的右侧方向 θ_c ($\theta_c = 6^\circ$) 向偏北方向加速移动。在 3h 内, 热带气旋的移向逆时针旋转了 129° 。

总之, 在第 23~30 小时期间, 由于对称气流对非对称涡度平流的作用, 小尺度涡旋绕热带气旋中心逆时针旋转了 306° ; 通风气流的平均方向逆时针旋转了 317° 。在旋转的通风气流的引导下, 热带气旋的移向逆时针旋转了 275° , 从而经历了一次逆时针打转运动过程。

3 结语和讨论

综上所述, 我们可以得出如下几点结论。

(1) 应用无基本气流的准地转三层斜压模式可以数值模拟出热带气旋逆时针打转运动。

(2) 对称气流对非对称涡度的平流引起非对称流场中的小尺度涡旋绕热带气旋中心逆时针旋转。

(3) 小尺度涡旋逆时针的旋转导致通风气流逆时针旋转。

(4) 旋转的通风气流引导热带气旋作逆时针打转运动。

由本文的研究结果可以推论: 在弱环境流场中, 热带气旋逆时针打转的时间尺度和空间尺度可能与热带气旋本身的强度和水平尺度有关。在一定的热带气旋水平尺度的情况下, 较弱的热带气旋逆时针打转的时间尺度可能较长。在一定的热带气旋强度的情况下, 水平尺度较大的热带气旋逆时针打转的空间尺度可能较大。这些推论有待进一步研究证实。

应当指出, 斜压大气中热带气旋移动的动力学问题相当复杂, 它涉及到很多物理过程。本文设计的准地转斜压模式是很简单的。该模式假定基本气流为零, 没有引入湿物理过程, 没有充分地考虑各种物理量在垂直方向的输送。因此, 模式大气中的热带气旋整体结构与实际大气中的尚有差别。如果进一步改进模式, 可望得到更好的数值模拟结果。

致谢: 在本文的研究过程中, 得到罗哲贤教授的热情指导和帮助。在此向他表示诚挚的谢意!

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 董克勤. 热带气旋移动研究评述. 热带气象,1987, 3(4):356~363
- 3 Chan J C L, Williams R T. Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion, Part 1: Zero mean flow. J Atmos Sci, 1987, 44(9): 1257~1265
- 4 Fiorino M, Elsberry R L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. J Atmos Sci, 1989, 46(7):975~990
- 5 李天明,朱永祺. 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
- 6 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
- 7 Tian Yongxiang, Luo Zhexian. Vertical structure of beta gyres and its effect on tropical cyclone motion. AAS, 1994, 11(1): 43~50
- 8 Kitade T. Numerical experiments of tropical cyclones on a plane with variable coriolis parameter. J Met Soc Japan, 1980, 58(6): 471~487
- 9 田永祥. 非对称环流的细致结构与台风路径的摆动. 南京气象学院学报,1994, 17(4):399~404

ON PHYSICAL MECHANISM OF TROPICAL CYCLONE LOOPING IN A COUNTERCLOCKWISE SENSE

Tian Yongxiang

(Department of Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Abstract The problem of a tropical cyclone looping counterclockwise is investigated using a quasi-geostrophic baroclinic model without basic flow involved. Analyses show that asymmetric vorticity advected by symmetric flow gives rise to the counterclockwise rotation of small-scale gyres and ventilation flow in the asymmetric field, the latter of which is responsible for the counterclockwise looping of the tropical cyclone.

Keywords tropical cyclone, looping, vorticity advection, small-scale gyres, ventilation flow