

热带气旋的水平尺度对其移动的影响

田永祥¹⁾ 赵远东¹⁾ 江燕如²⁾

(1) 南京气象学院气象学系, 2) 南京气象学院气象台, 南京 210044)

摘 要 应用无基本气流的无辐散正压模式研究热带气旋的水平尺度对其移动的影响。水平尺度较小的(较大的)热带气旋向西北偏北(西北偏西)移动。水平尺度较小的(较大的)热带气旋使其大尺度 涡旋逆时针旋转 一个较小的(较大的) 角度 ι 。热带气旋的移向 ϵ 与角度 ι 有关, 即 $\epsilon \approx 360^\circ - \iota$ 。因此, 热带气旋的移向随其水平尺度的增大而逆时针向西偏转。

关键词 热带气旋, 水平尺度, 影响, 移动

分类号 p435

热带气旋结构对其移动有重要影响。80年代末期, Chan 和 Williams^[1]考察热带气旋强度和水平尺度对其移动的影响。Fiorino 和 Elsberry^[2]研究热带气旋内部、外部结构与其移动的关系。90年代中期, 一些观测分析和理论研究结果^[3~6]表明: 热带气旋的非对称结构与其移动密切相关。田永祥和赵远东^[7]应用非对称理论研究热带气旋强度影响其移动的机理。本文将探讨热带气旋水平尺度影响其移动的物理机制。

1 数值模式

在无基本气流的假定下, 无辐散正压模式的控制方程为

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = - J(\psi, \psi) - \frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{1}$$

式中 ψ 为扰动流函数(以后简称为流函数)。该方程表明, 线性项与非线性项的共同作用引起流函数随时间变化。

热带气旋的初始切向风速廓线取为^[1]

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

式中 $r = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$ 为半径, (x_0, y_0) 为热带气旋中心坐标, V_m 为最大风速, r_m 为最大风速半径, 而 b 为决定热带气旋形状的因子。与(2)式相对应的热带气旋的初始涡度场为^[1]

南京气象学院科研基金资助项目9601
收稿日期: 1997-09-30; 改回日期: 1998-03-14
第一作者简介: 田永祥, 男, 1940年3月生, 副教授

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

(3)

根据已知的初始涡度场 (x, y) 求解泊松方程

$$\nabla^2 \psi(x, y) = -\zeta(x, y)$$

(4)

得到热带气旋的初始流函数场 $\psi(x, y)$ 。

数值试验区域是一个纬向通道。在通道的东、西边界取周期性的边界条件; 在通道的南、北边界取流函数为零的边界条件。

模式方程采用了 β -平面近似, 其中的 Rossby 参数取在 15°N 的数值。

2 数值试验结果

为了考察热带气旋水平尺度对其移动的影响, 本研究实验了 A、B 和 C 三种方案。其最大风速半径 r_m 分别取为 100、150 和 200 km, 最大风速 V_m 均取为 35 m s^{-1} , 形状因子 b 均取为 1。根据 (2) 式确定各方案热带气旋初始风速廓线(图 1)。由 (3) 和 (4) 式分别求得热带气旋的初始涡度场和流函数场。采用 Arakawa^[8] 设计的有限差分格式计算模式方程 (1) 中的雅可比项。应用超张弛迭代法数值求解该模式方程。采用“三步法”起步的中央差分格式进行时间积分。时间步长取 10 min, 总积分时间为 3 个模式日。在数值积分的过程中, 应用二次曲面拟合方法由流函数的分布确定热带气旋中心的位置。

数值试验结果表明, 热带气旋的移动与其水平尺度有关。在 25~72 h 期间, 水平尺度较小的、中等的和较大的热带气旋的平均移速 $\bar{V}_c$ 分别为 3.0、3.5 和 3.5 m s^{-1} (下述的平均物理量均为该物理量在 25~72 h 期间的平均值), 而最大移速分别为 5.3、5.4 和 4.9 m s^{-1} (图 2, 图 3a)。由此可见, 热带气旋的平均移速并非简单地随热带气旋水平尺度的增大而增大。

热带气旋向正北移动, 规定其移动向 $\bar{\alpha}_c$ 为零, $\bar{\alpha}_c$ 沿顺时针方向增加。水平尺度较小的、中等的和较大的热带气旋的平均移向 $\bar{\alpha}_c$ 分别为 333° 、 323° 和 302° , 即它们分别向西北偏北、西北和西北偏西移动(图 3b)。由此可见, 热带气旋的平均移向随其水平尺度的增大而向逆时针方向偏转。这一实验结果与 Chan 和 Williams^[1] 的基本一致。

热带气旋的移速随时间振荡、移向随时间摆动。在 3 个模式日中, 三种实验方案的热带气旋移速均有 5 次主要的振荡。每一次移速振荡都伴随移向的摆动(图 3a、b)。

在 23~35 h 期间, 水平尺度较小的热带气旋有一次逆时针打转移动过程。热带气旋的移向由向西先后转为向南、东、东北偏北、西北偏北和西北移动(图 2, 图 3b)。伴随这次逆时针打转

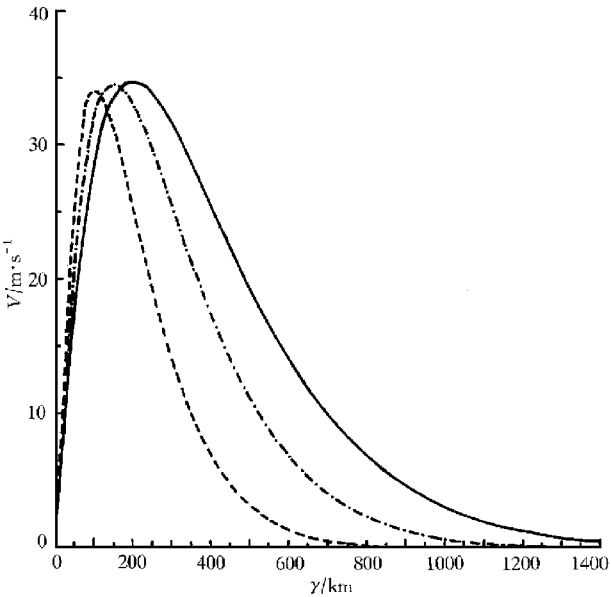


图1 方案 A(虚线)、B(点划线)和 C(实线)的热带气旋
初始切向风速 V 随半径 r 的变化

Fig. 1 Variations of the initial tangential wind V of tropical
cyclone with radius r for schemes A (dash line), B (dot-dash line)
and C (solid line)

运动, 热带气旋的移速先由 3.3 m s^{-1} 减小到 0.6 m s^{-1} , 然后又增加到 2.9 m s^{-1} , 出现一次移速振荡(图3a)。应当指出, 水平尺度中等的和较大的热带气旋均未出现逆时针打转运动。

热带气旋的移动与非对称环流有关。在本研究中, 我们把流函数 $\psi(x, y, t)$ 分解为其轴对称分量 $s(x, y, t)$ 和非对称分量 $a(x, y, t)$, 并计算非对称流函数场中的通风气流矢量 (V_f, f) 以及通风气流矢量 (V_f, f) 与热带气旋移动矢量 (V_c, c) 的相关系数 R_v 和 R_c ^[5~6]。由图4可见, 水平尺度较小的热带气旋的 R_v 的最大值可达0.74, 最佳相关尺度^[6]为400 km。水平尺度中等的和较大的热带气旋的 R_v 之最大值均为0.73, 最佳相关尺度均 $\geq 500\text{ km}$ 。各方案的通风气流

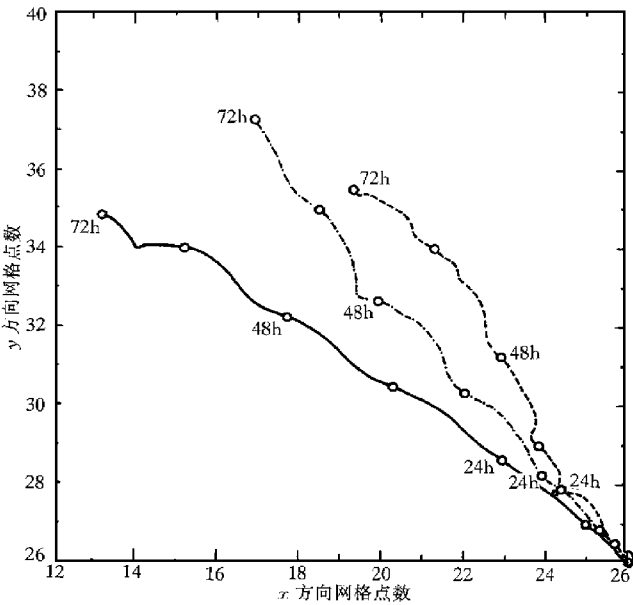


图2 方案A(虚线)、B(点划线)和C(实线)的热带气旋路径
Fig. 2 Tropical cyclone tracks for the same schemes as in Fig. 1

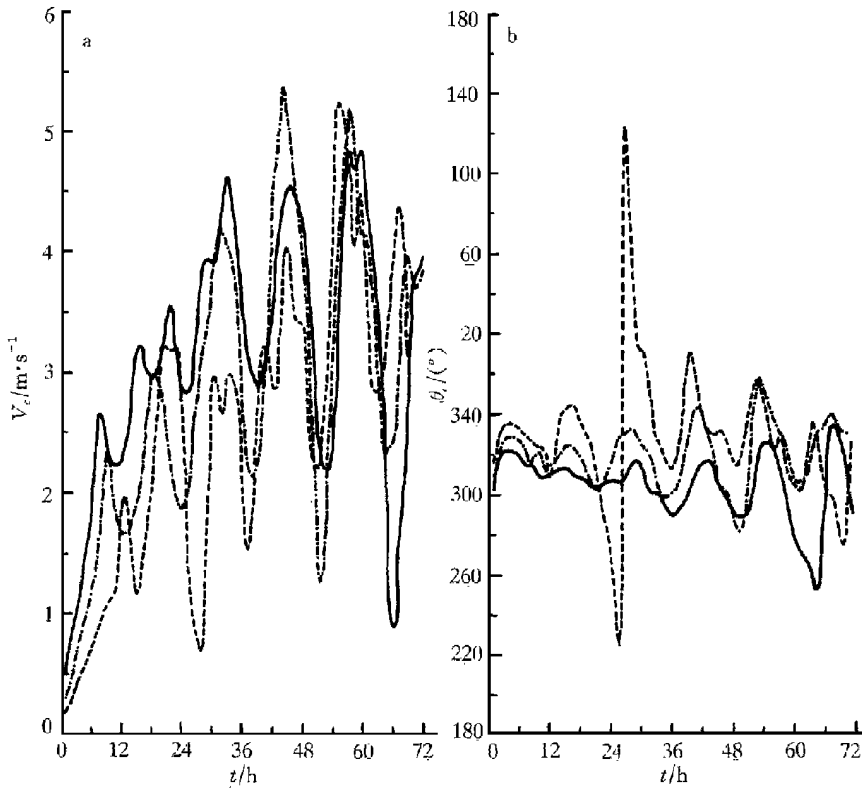


图3 方案A(虚线)、B(点划线)和C(实线)的热带气旋的移速 V_c (a)和移向 c (b) 随时间的变化
Fig. 3 Temporal variations of (a) the moving speed of tropical cyclone V_c and
(b) the moving direction c for the same schemes as in Fig. 1

方向 f 与热带气旋移向 c 的相关系数 R 一般比 R_v 小, 其最大值为 0.60(图略)。

3 结果分析

3.1 热带气旋移速变化的机理分析

流函数倾向分析结果表明: 非对称气流对称涡度的平流(即 $-J(\psi_s, \zeta_s)$ 或 $-V_a \cdot \nabla \zeta_s$) 移动对称的热带气旋环流^[9], 而非对称气流 V_a 的强弱又与大尺度涡旋的强度有关。此外, 由线性项的对称分量 $-\zeta_s$ 引起的流函数倾向为偶极子型分布, 且关于热带气旋中心呈东—西向对称。这种流函数倾向产生热带气旋非对称流场中的大尺度涡旋对^[10]。

显然, 大尺度涡旋的强度与热带气旋的对称风速分量 v_s 有关。在本研究中, A、B 和 C 三种试验方案初始时刻热带气旋的非对称风速 V_a 为零。因此, 对称风速 V_s 即为图 1 所示的切向风速 V 。在半径 $r > 200\text{km}$ 的区域, 水平尺度较大的热带气旋具有较大的对称风速 V_s 。因而, 它产生较强的大尺度涡旋。

方案 A、B 和 C 的大尺度气旋性涡旋的平均强度分别为 114 、 175 和 $249 (\times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1})$, 大尺度反气旋性涡旋的平均强度分别为 132 、 210 和 $243 (\times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1})$; 而大尺度涡旋的平均水平尺度(即反气旋性、气旋性涡旋中心之间的平均距离)分别为 977 、 1306 和 1437km (图 5a、b)。

通过热带气旋中心的非对称气流的强弱一般与沿 dl 方向的非对称流函数梯度呈比例。根据前面给出的大尺度涡旋的平均强度和水平尺度, 得到方案 A、B 和 C 的非对称流函数平均梯度分别为 0.25 、 0.30 和 $0.34 (\times 10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}/\text{m})$ 。由于方案 B 的非对称流函数平均梯度比 A 方案的大, 所以方案 B 的热带气旋平均移速(3.5m s^{-1})比方案 A 的(3.0m s^{-1})快。

应当指出, 在数值积分的后期, 方案 C 的大尺度气旋性涡旋已逐渐靠近数值试验区域的西南边界(参见图 7), 这会影响该系统的移动, 并进而影响该方案非对称流函数平均梯度与热带气旋平均移速的对应关系。在今后的研究中, 尚需扩大数值试验区域。

3.2 热带气旋移向变化的机理分析

文献 [9] 指出, 对称气流对非对称涡度的平流(即 $-J(\psi_s, \zeta_a)$ 或 $-V_s \cdot \nabla \zeta_a$) 逆时针旋转大尺度涡旋。为了恰当地描述大尺度涡旋的旋转, 我们定义: 大尺度反气旋性、气旋性两涡旋中心的连线与 x 轴的交角 ι 为大尺度涡旋的方位相角(ι 沿逆时针方向增加)。

前面已经指出, 在半径 $r > 200\text{km}$ 的区域, 水平尺度较大的热带气旋具有较大的对称风速 V_s 。因此, 较大的对称气流对非对称涡度的平流使 ι 逆时针旋转较大的角度。方案 A、B 和 C 的大尺度涡旋平均方位相角 ι 分别 17° 、 27° 和 44° (图 6, 图 7)。各方案热带气旋平均移向 c 与

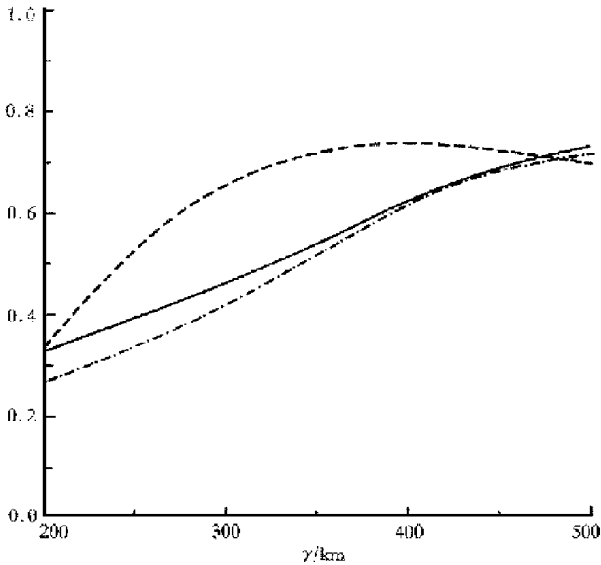


图4 方案 A(虚线)、B(点划线)和 C(实线)的相关系数 R_v 随计算通风气流的圆形区域的半径 r 的变化

Fig. 4 Variations of the correlation coefficient R_v with radius r of circular areas for calculating the ventilation flow for the same schemes as in Fig. 1

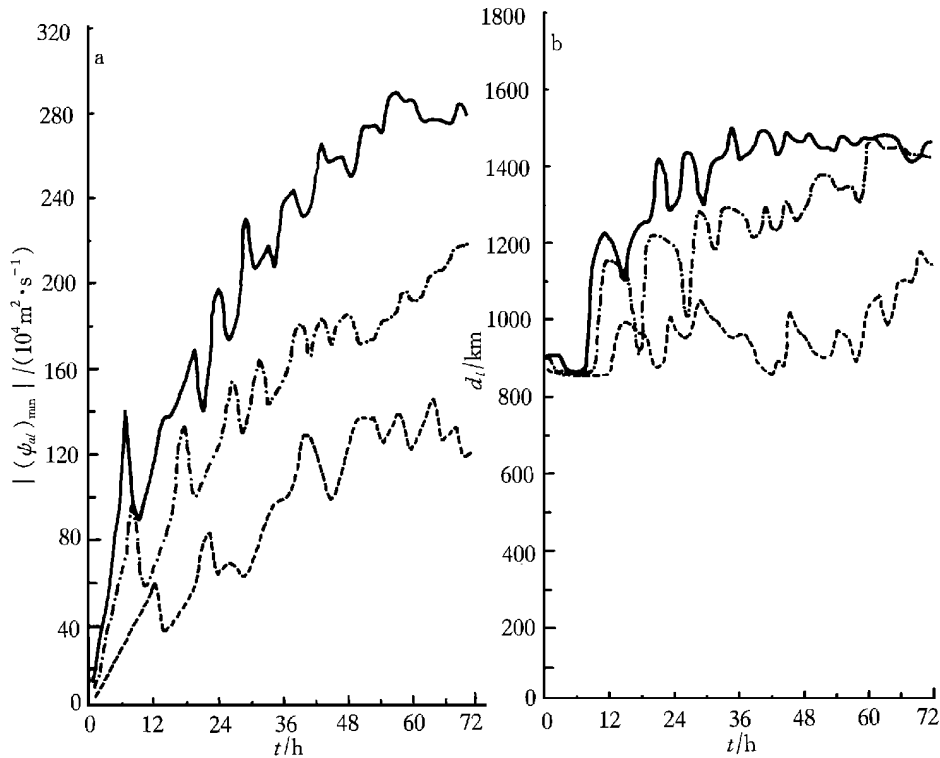


图5 方案A(虚线)、B(点划线)和C(实线)的热带气旋的大尺度气旋性 涡旋的强度 $|(\psi_d)_{min}|$ (a)和大尺度 涡旋的水平尺度 d_l (b)随时间的变化

Fig. 5 Temporal variations of (a) the intensity of large-scale cyclonic beta gyre $|(\psi_d)_{min}|$ and (b) the horizontal scale of large-scale beta gyres d_l for the same schemes as in Fig. 1

$\bar{\alpha}_l$ 有如下的对应关系:

$$\bar{\alpha}_c \approx 360^\circ - (\bar{\alpha}_l + \beta) \tag{5}$$

式中 β 为一订正角度。取 $\beta = 12^\circ$, 并将 $\bar{\alpha}_l$ 之值代入 (5) 式, 得到方案 A、B 和 C 的热带气旋平均移向 $\bar{\alpha}_c$ 分别为 331° 、 321° 和 304° 。它们与相应方案的热带气旋实际平均移向 (333° 、 323° 和 302°) 只有 $\pm 2^\circ$ 之差。

3.3 热带气旋移速振荡和移向摆动的机理分析

流函数倾向分析结果表明, 对称气流对非对称涡度的平流产生小尺度涡旋, 并使小尺度涡旋绕热带气旋中心逆时针旋转^⑨。小尺度涡旋与大尺度涡旋相互作用导致热带气旋作加速、减速、转向和(或)逆时针打转等多种运动。关于热带气旋移速振荡、移向摆动、以及逆时针打转的机理, 在文献 ④、⑤和 ⑥中都有详细的论述。

应当指出, 水平尺度较小的热带气旋的小尺度涡旋的活动时间较长, 一般为10多个小时, 而且有一个绕热带气旋中心逆时针旋转的完整的活动周期。小尺度涡旋逆时针旋转导致通风气流逆时针旋转, 旋转的通风气流促使热带气旋作逆时针打转运动。水平尺度中等的和较大的热带气旋的小尺度涡旋活动时间较短, 一般不超过5 h, 而且没有一个绕热带气旋中心逆时针旋转的完整活动周期。因此, 这些热带气旋没有出现逆时针打转运动。关于不同水平尺度热带气旋的小尺度涡旋的发生、发展, 及其与大尺度 涡旋相互作用等问题, 还有待深入地研究。

4 结语和讨论

综上所述,我们应用无基本气流的无辐散正压模式研究热带气旋水平尺度影响其移动的物理机制,得到如下的结论:

(1) 水平尺度较小(较大)的热带气旋平均移速较慢(快)。但热带气旋平均移速并非简单地随热带气旋水平尺度的增大而增大。

(2) 线性 项的对称分量产生热带气旋非对称流场中的大尺度 涡旋。水平尺度较小(较大)的热带气旋产生的大尺度 涡旋的强度较弱(较强)大尺度 涡旋的水平尺度较小(较大)。由这两个因子所确定的沿 dl 方向的非对称流函数平均梯度与

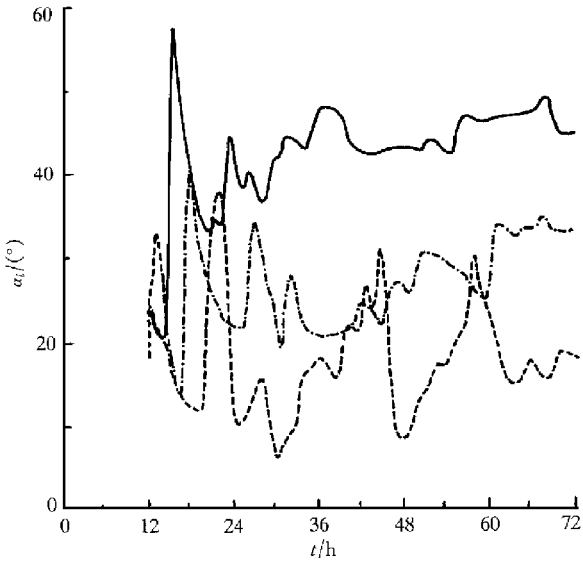


图6 方案A(虚线)、B(点划线)和C(实线)的大尺度 涡旋方位相角 α_l 随时间的变化

Fig. 6 Temporal variations of the azimuthal / phase angle of large-scale beta gyres α_l for the same schemes as in Fig. 1

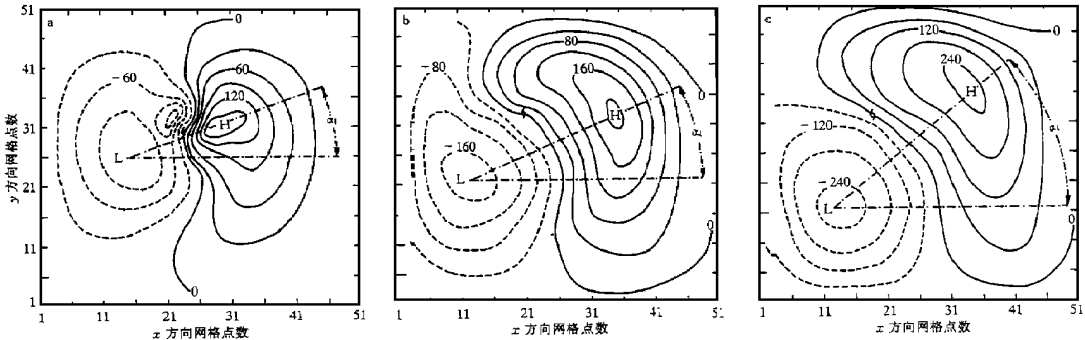


图7 第44小时方案A($\alpha_l = 21^\circ$) (a), 方案B($\alpha_l = 24^\circ$) (b), 方案C($\alpha_l = 42^\circ$) (c) 的大尺度 涡旋的方位相角 α_l

Fig. 7 The azimuthal / phase angle of large-scale beta gyres α_l at 44th h for the schemes A($\alpha_l = 21^\circ$), B($\alpha_l = 24^\circ$), and C($\alpha_l = 42^\circ$)

热带气旋平均移速成比例。

(3) 水平尺度较小(较大)的热带气旋向西偏北(西北偏西)移动。

(4) 对称气流对非对称涡度的平流逆时针旋转大尺度 涡旋。水平尺度较小(较大)的热带气旋的对称气流使大尺度 涡旋逆时针旋转的平均角度 $\bar{\alpha}_l$ 较小(较大)。热带气旋的平均移向 $\bar{\alpha}_c$ 与 $\bar{\alpha}_l$ 有关($\bar{\alpha}_c \approx 360^\circ - \bar{\alpha}_l$)。因此,热带气旋平均移向随其水平尺度的增大而向逆时针方向偏转。

应当指出,热带气旋强度和水平尺度这两个因子是相互联系的。一般强热带气旋的水平尺度较大,而弱热带气旋的水平尺度较小。因此,要想完全孤立地研究热带气旋水平尺度对其移动的影响是有一定困难的。

参 考 文 献

- 1 Chan J 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
- 2 Fiorino M, Elsberry R L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J Atmos Sci*, 1989, 46(7): 975~990
- 3 Tian Yongxiang, Luo Zhexiong. Vertical structure of beta gyres and its effect on tropical cyclone motion. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1994, 11(1): 43~50
- 4 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*, 1995, 6(增刊): 108~115
- 5 Tian Yongxiang. Ventilation flow in a baroclinic vortex related to tropical cyclone motion. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9(3): 338~348
- 6 田永祥. 斜压涡旋中的通风气流与热带气旋移动的关系. *气象学报*, 1996, 54(1): 83~94
- 7 田永祥, 赵远东. 热带气旋强度影响其移动的物理机制. *南京气象学院学报*, 1997, 20(1): 11~17
- 8 Arakawa A. Computational design for long-term numerical integration for the equations of atmospheric motion. *J Comput Physics*, 1966, 1: 119~143
- 9 Tian Yongxiang, Niu Xuexin. Effect of the nonlinear term on movement and development of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 12(2): 149~161
- 10 Tian Yongxiang, Niu Xuexin. Effect of the linear term on movement and development of tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 12(1): 50~62

EFFECT OF TROPICAL CYCLONE HORIZONTAL SCALE ON ITS MOTION

Tian Yongxiang Zhao Yuandong

(Department of Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Jiang Yanru

(Weather Forecasting Laboratory, NIM, Nanjing 210044)

Abstract The effect of tropical cyclone horizontal scale on its motion is investigated in a nondivergent, barotropic model with no basic flow. The tropical cyclone whose horizontal scale is smaller (larger) moves toward the northwest by north (the northwest by west). The asymmetric flow of the smaller (larger) tropical cyclone causes the large scale beta gyres to counterclockwise rotate a smaller (larger) angle α . The moving direction of tropical cyclone θ is related to the angle α , i. e., $\theta \approx 360^\circ - \alpha$. Therefore, the moving direction of tropical cyclone counterclockwise deflects to the west with the increasing of horizontal scale.

Keywords tropical cyclone, horizontal scale, effect, motion