

# 双热带气旋相互作用的研究\*

田永祥 寿绍文

(南京气象学院, 南京, 210044)

## 摘 要

采用无基本气流的无辐散正压模式模拟了双热带气旋的运动。应用非对称理论研究了双热带气旋的相互作用。双热带气旋中的每个热带气旋主要由通过其中心的非对称气流(即通风气流)作用而移动。这股非对称气流是由其自身的线性和非线性效应产生的非对称涡旋与其配对热带气旋形成的非对称涡旋相叠加而引起的。

关键词: 双热带气旋, 相互作用, 非对称涡旋, 通风气流。

## 1 引 言

双热带气旋相互作用的问题一直为气象界所关注。早在 20 世纪 20 年代初期, 藤原<sup>[1]</sup>发现: 两个转动方向相同的涡旋相互旋转和靠近。这种现象称为“藤原效应”。Brand<sup>[2]</sup>的统计研究结果表明: 双热带气旋的旋转依赖于其中心距离  $D$ 。王作述等<sup>[3]</sup>给出了双台风相互旋转的角度与其中心距离的经验关系式。王玉清等<sup>[4]</sup>指出: 线性  $\beta$  项和非线性项对双热带气旋的相互作用均有重要的影响。魏鼎文等<sup>[5]</sup>的实验研究表明: 双台风互旋的起始距离与参数  $L(L = D/r)$  有关。

在上述研究工作的基础上, 文中采用无基本气流的无辐散正压模式模拟了双热带气旋的运动, 并应用非对称理论阐述双热带气旋相互作用的物理机制。

## 2 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

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -J(\psi, \psi) - \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1)$$

式中  $\psi$  为扰动流函数(以后简称为流函数)。

双热带气旋的初始涡度场<sup>[6]</sup>取为

$$\zeta(x, y) = \frac{2V_{MA}}{r_{MA}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{r_A}{r_{MA}} \right)^b \right] \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[ 1 - \left( \frac{r_A}{r_{MA}} \right)^b \right] \right\} + \frac{2V_{MB}}{r_{MB}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{r_B}{r_{MB}} \right)^b \right] \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[ 1 - \left( \frac{r_B}{r_{MB}} \right)^b \right] \right\} \quad (2)$$

\* 初稿时间: 1997 年 3 月 12 日; 修改稿时间: 1998 年 4 月 30 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(49775259)。

式中  $r_A = \sqrt{(x_A - x_{OA})^2 + (y_A - y_{OA})^2}$  是以西热带气旋中心  $(x_{OA}, y_{OA})$  为圆心的圆半径;  $r_B = \sqrt{(x_B - x_{OB})^2 + (y_B - y_{OB})^2}$  是以东热带气旋中心  $(x_{OB}, y_{OB})$  为圆心的圆半径;  $V_{MA}$  和  $r_{MA}$  ( $V_{MB}$  和  $r_{MB}$ ) 分别为西热带气旋(东热带气旋)的最大风速和最大风速半径; 而  $b$  为决定热带气旋形状的因子。

根据已知的双热带气旋初始涡度场  $\zeta(x, y)$  求解泊松方程

$$\nabla^2 \psi(x, y) = \zeta(x, y) \quad (3)$$

得到其初始流函数场  $\psi(x, y)$ 。

数值试验区域是一个纬向通道。在通道的东西、南北方向各取 51 个网格点。网格是均匀的, 网格距取 50 km。通道的东、西边界取周期性边界条件; 南、北边界取法向方向流函数梯度为零的边界条件。

研究试验了如表 1 所示的 3 种方案。各方案东、西热带气旋的最大风速半径均为 100 km, 形状因子  $b$  皆为 1。

表 1 试验方案

方 案	$V_{MA}(\text{ms}^{-1})$	$V_{MB}(\text{ms}^{-1})$	$D(\text{km})$
1	25	40	600
2	25	25	600
3	25	15	600

模式方程(1)中的雅可比项采用荒川格式计算。应用超张弛迭代法和蛙跃积分格式数值求解该模式方程。数值积分的时间步长取 10 min, 总积分时间为 4 个模式日。Rossby 参数  $\beta$  取其在 25 N 的数值 ( $\beta = 2.0746 \times 10^{-11} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), 即采用  $\beta$  平面近似。

### 3 数值试验结果分析

#### 3.1 双热带气旋路径的特征

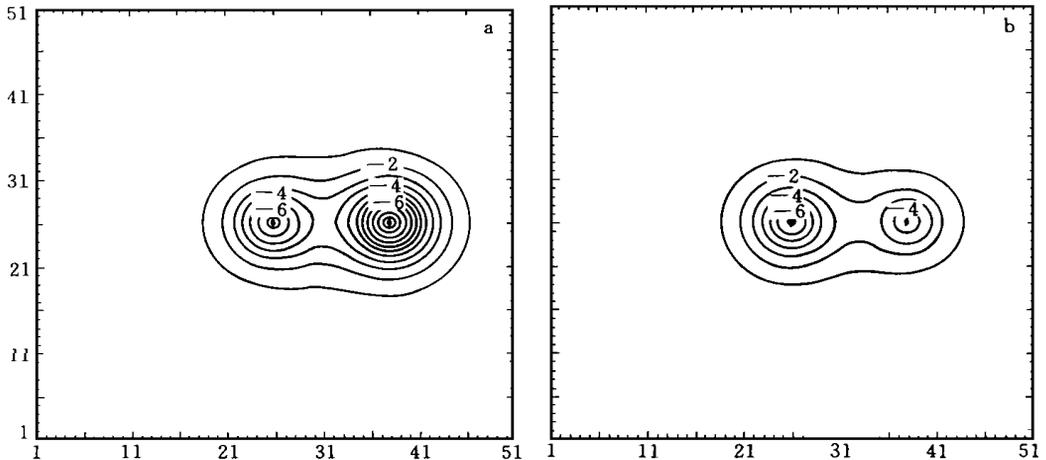


图 1 双热带气旋初始流函数  $\psi$

(a. 方案 1; b. 方案 3。等值线间隔均为  $1.0 \times 10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ , 纵横坐标上的数字为网格点的坐标)

Chan 和 Williams<sup>[6]</sup> 研究表明: 在无基本气流的情况下, 孤立热带气旋一般是向西北偏北移动。然而在双热带气旋的情况下, 其路径发生了显著的变化。

在方案 1 和方案 3 的初始场中(图 1), 在西热带气旋中心以东 600 km 处分别有一较强的和较弱的热带气旋。在较强的东热带气旋的影响下, 方案 1 的西热带气旋先向西南偏南后转向北移动, 经历了一次大的逆时针打转运动(图 2)。在西热带气旋的影响下, 东热带气旋在前 18 h 向北移动, 随后它蛇形摆动向西北偏北移动。这种模拟的双热带气旋路径归属于观测的西热带气旋打转类型的路径。

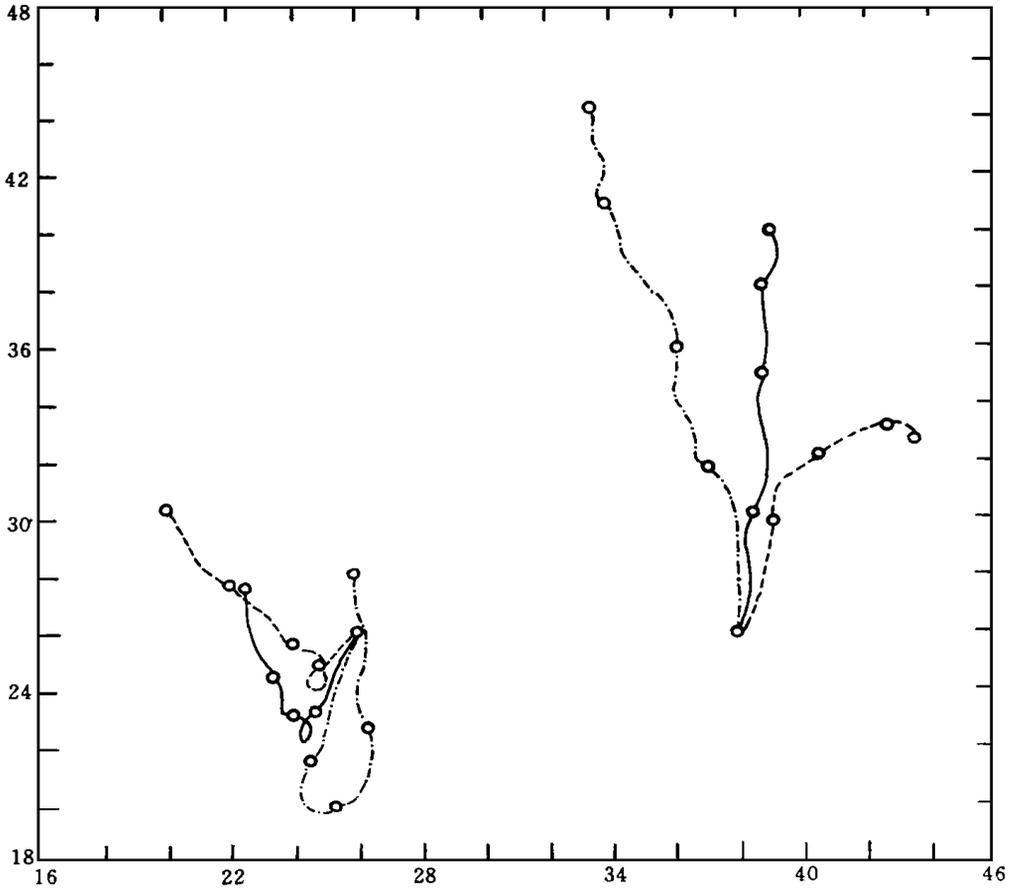


图 2 双热带气旋路径

(点断线为方案 1, 实线为方案 2, 断线为方案 3。

沿路径的标号的时间间隔为 24 h(其他同图 1))

在较弱的东热带气旋影响下, 方案 3 的西热带气旋在前 24 h 向西南移动, 随后经历一次小的逆时针打转, 在第 48 h 以后转向西北移动(图 2)。在西热带气旋的影响下, 东热带气旋在前 36 h 向东北偏北移动, 随后转向, 向东北偏东移动。这种模拟的双热带气旋路径基本归属于观测的东热带气旋转向类型的路径。

### 3.2 双热带气旋相互作用的物理机制

#### 3.2.1 方案 1 双热带气旋的相互作用

##### 3.2.1.1 东热带气旋对西热带气旋移动的影响

数值积分的初始阶段, 西热带气旋中心以东, 由东热带气旋形成较强的非对称气旋性涡旋, 其他方向为相应的反气旋性涡旋。由于线性  $\beta$  效应, 西热带气旋中心以西和以东分别产生大尺度气旋性和反气旋性  $\beta$  涡旋<sup>[7,8]</sup>。应当指出: 大尺度气旋性  $\beta$  涡旋的方位相位与由东热带气旋形成的非对称涡旋的方位相位刚好相反。这些非对称涡旋相叠加, 构成初始西热带气旋的非对称环流形势(图 3a)。通过西热带气旋中心的东北偏北非对称气流促使它在前 12 h 向西南偏南移动(图 2)。

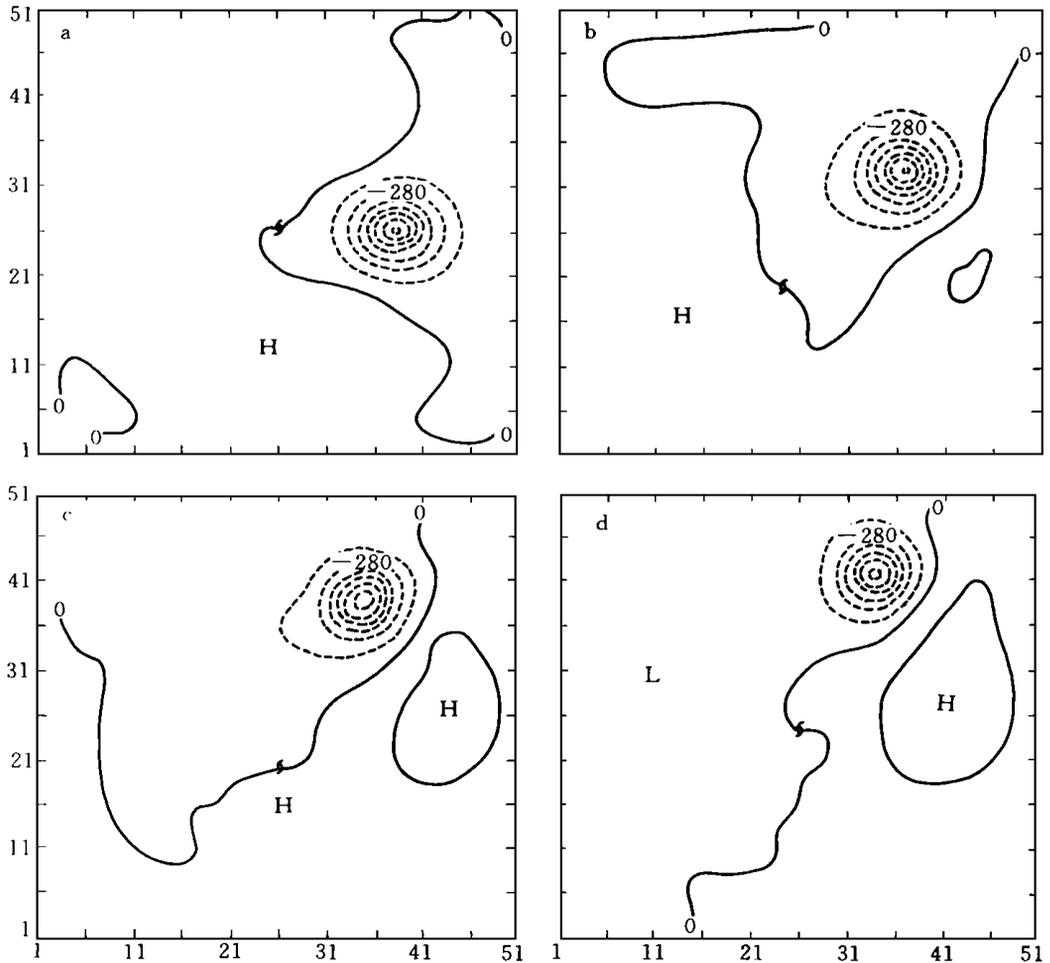


图 3 方案 1 的西热带气旋的非对称流函数  $\psi_a$

(a. 1 h; b. 32 h; c. 60 h; d. 78 h. 等值线间隔均为  $140 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (其他同图 1))

随着西热带气旋向西南偏南、东热带气旋向北、西北偏北方向移动, 两者的相对位置发生变化。东热带气旋位于西热带气旋的东北方向(图 3b)。偏北、西北非对称气流导致西热带气旋在 12 ~ 36 h 期间向偏南、东南移动(图 2)。

随着东热带气旋的进一步北移,西热带气旋的非对称流场发生明显变化。在西热带气旋的东北偏北方向为由东热带气旋形成的气旋性涡旋;偏东方向为反气旋性涡旋(图3c)。通过西热带气旋中心的偏西、西南非对称气流造成它在36~60h期间向偏东、东北移动(图2)。

东热带气旋向西北偏北移动的过程中,其后部的反气旋性涡旋对西热带气旋的影响越来越大(图3d),西热带气旋中心以西的气旋性涡旋和以东的反气旋性涡旋之间的偏南非对称气流促使它在第60小时以后向偏北移动(图2)。

总之,由于双热带气旋的相互作用,西热带气旋经历一次大的逆时针打转运动。应当指出:这种逆时针打转不是由小尺度涡旋逆时针旋转引起的,而是由大尺度气旋性、反气旋性非对称涡旋相对位置的变化而造成的。

### 3.2.1.2 西热带气旋对东热带气旋移动的影响

数值积分的初始阶段,东热带气旋中心以西,由西热带气旋形成非对称气旋性涡旋,

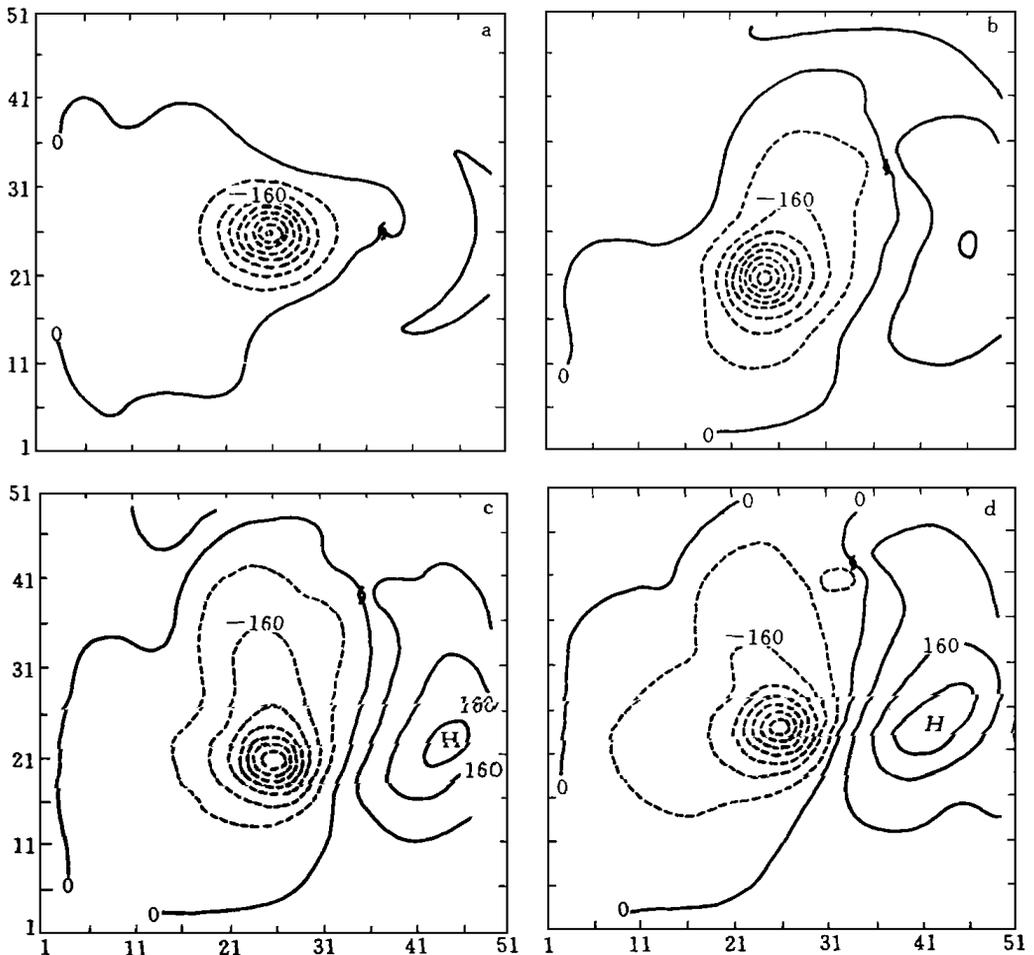


图4 方案1东热带气旋的非对称流函数 $\psi_a$

(a. 1h; b. 32h; c. 60h; d. 78h。等值线间隔均为 $80 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ (其他同图1))

其他方向为相应的反气旋性涡旋。由于线性  $\beta$  效应, 在东热带气旋中心以西和以东分别产生大尺度气旋性和反气旋性  $\beta$  涡旋。这些非对称涡旋相叠加, 构成初始东热带气旋的非对称环流形势(图 4a)。通过东热带气旋中心的南非对称气流促使它在前 18 h 向北移动(图 2)。

由于东热带气旋的线性  $\beta$  效应产生的气旋性  $\beta$  涡旋的方位相位与西热带气旋形成的非对称涡旋的方位相位相同, 东热带气旋的非对称环流形势比较稳定(图 4b, c, d)。在东、西两热带气旋相对运动的过程中, 通过东热带气旋中心的稳定的东南偏南非对称气流导致它向西北偏北移动(图 2)。

### 3. 2. 2 方案 3 双热带气旋的相互作用

#### 3. 2. 2. 1 东热带气旋对西热带气旋移动的影响

方案 3 的东热带气旋较弱, 由它形成的非对称气旋性涡旋也相对较弱。随着西热带气

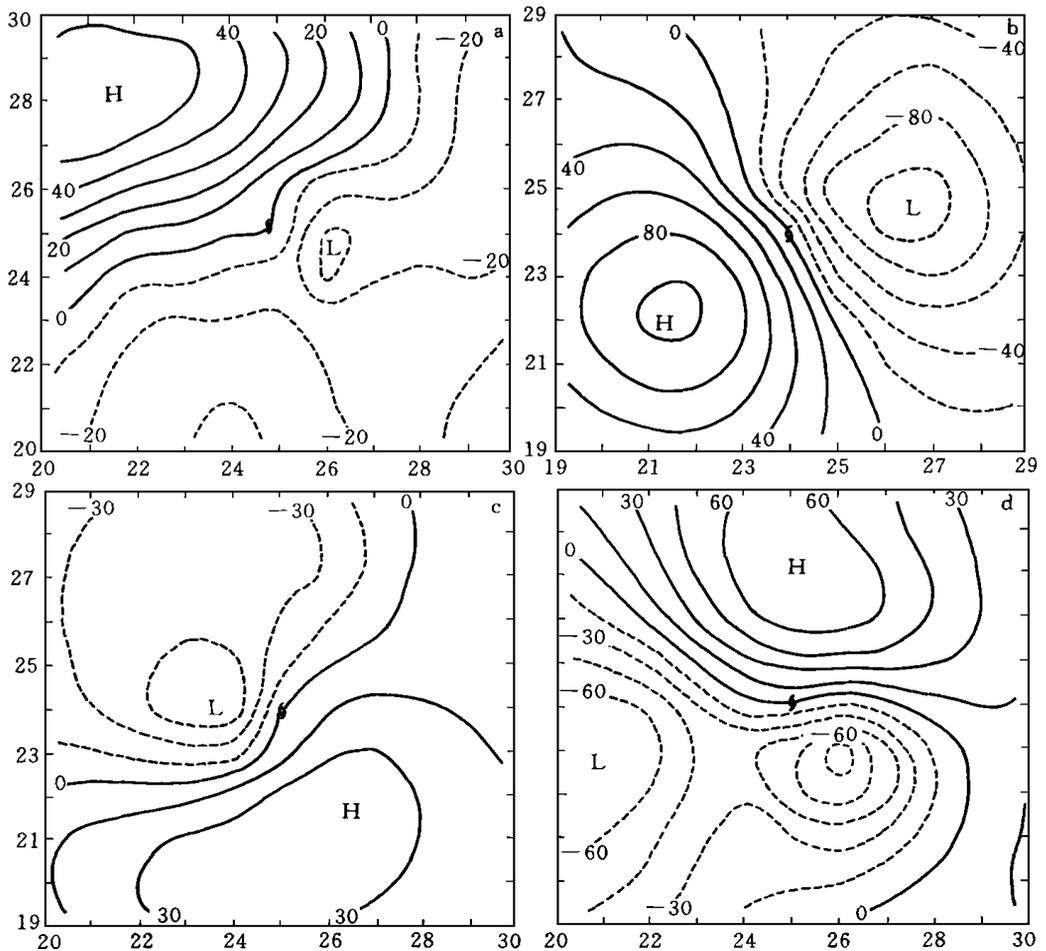


图 5 方案 3 西热带气旋的非对称流函数  $\psi_a$

(a. 20 h; b. 28 h; c. 30 h; d. 36 h。等值线间隔分别为

10, 20, 15 和 15 ( $10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ), 横、纵坐标上的数字为网格点的坐标)

旋向西南、东热带气旋向东北偏北移动,两者相距越来越远,东热带气旋对西热带气旋的影响也越来越小。因此,随后的移动过程中,西热带气旋的路径更多地由其自身的动力学因子所决定。

在第 20 小时,在西热带气旋的西北和东南方向分别有一反气旋性和气性小尺度涡旋<sup>[7]</sup>(图 5a)。通过西热带气旋中心的东北非对称气流促使它向西南移动(图 2)。由于西热带气旋的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<sup>[9, 10]</sup>。到第 28 小时,30 小时和 36 小时,西北、西南和东南非对称气流(图 5b, c, d)导致西热带气旋分别向东南、东北和西北移动(图 2)。

总之,在 20~36 h 期间,西热带气旋的对称气流对非对称涡度的平流引起小尺度涡旋逆时针旋转。小尺度涡旋逆时针旋转导致非对称气流逆时针旋转。旋转的非对称气流促使西热带气旋作逆时针打转运动<sup>[10]</sup>(图 2)。

第 36 小时以后,东热带气旋更加远离西热带气旋。由西热带气旋自身产生的非对称涡旋逐渐控制它的移动。通过西热带气旋中心的偏东、东南、东南偏南非对称气流(图 6)造成它向偏西、西北、西北偏北移动(图 2)。

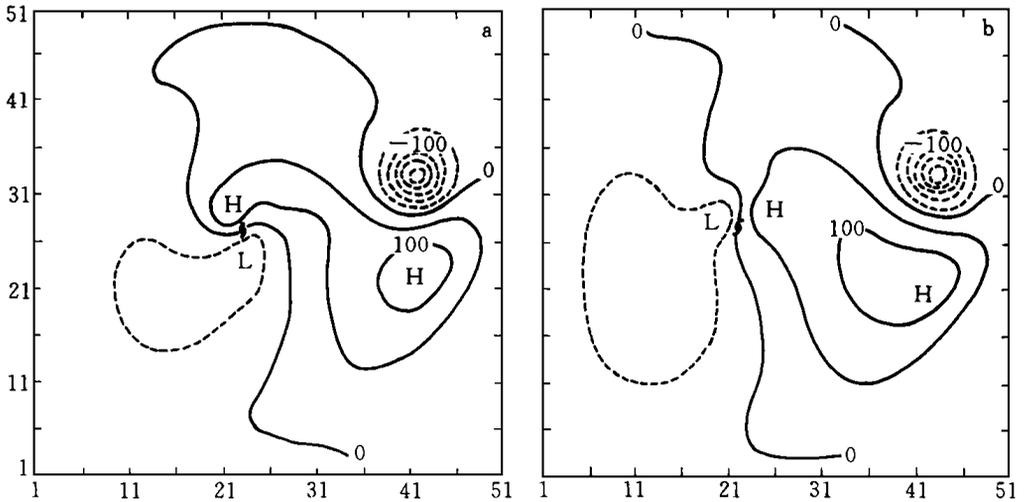


图 6 方案 3 西热带气旋的非对称流函数  $\psi_a$

(a. 60 h; b. 78 h. 等值线间隔均为  $50 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (其他同图 1))

### 3. 2. 2. 2 西热带气旋对东热带气旋移动的影响

在西热带气旋先向西南,经逆时针打转后转向西北,东热带气旋向东北偏北移动的过程中,虽然西热带气旋远离东热带气旋,但它始终影响东热带气旋的移动。由西热带气旋形成的非对称气旋性涡旋从东热带气旋的西南方一直伸向其东北方。东热带气旋的偏南方向为一反气旋性涡旋(图 7)。通过东热带气旋中心的不再是象方案 1 东热带气旋那样的偏南非对称气流(图 4c, d),而是西南、偏西非对称气流。这股非对称气流促使东热带气旋在第 36 小时以后转向,向东北、偏东移动(图 2)。

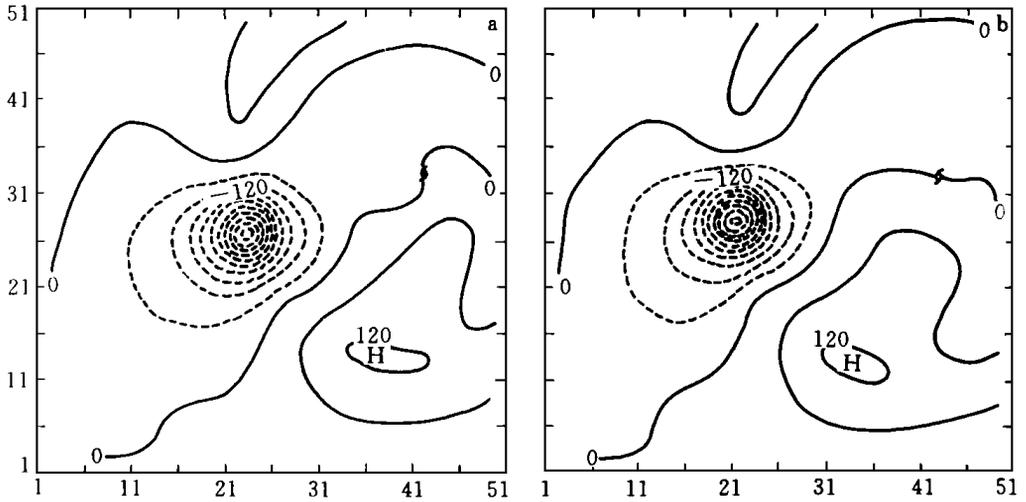


图7 方案3 东热带气旋的非对称流函数  $\psi_a$

(a. 60 h; b. 78 h。等值线间隔均为  $60 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$  (其他同图1))

#### 4 通风气流与热带气旋移动的关系

在以热带气旋中心为圆心, 半径  $r = 200 \sim 500 \text{ km}$  ( $\Delta r = 50 \text{ km}$ ) 的7种圆形区域内, 分别计算各方案东、西热带气旋的通风气流方向  $\theta$  和通风气流速度  $V_f$ , 以及  $\theta$  与热带气旋移向  $\theta_c$  的相关系数  $R_\theta$ ,  $V_f$  与热带气旋移速  $V_c$  的相关系数  $R_v$ <sup>[8]</sup>。

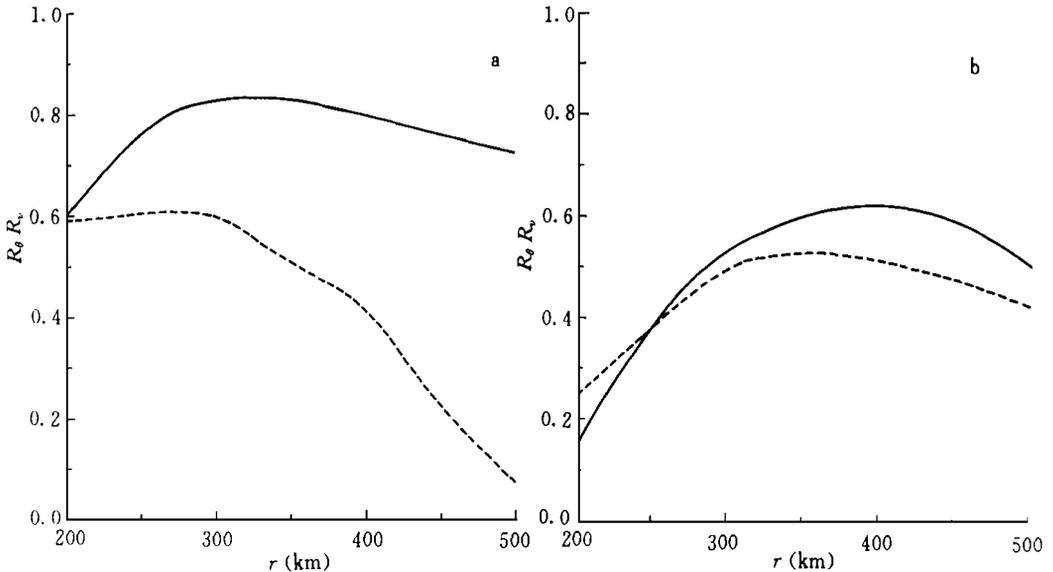


图8 方案1 东、西热带气旋的  $R_\theta$ ,  $R_v$  随计算通风气流的圆形区域的半径的变化

(a. 西热带气旋; b. 东热带气旋。  $R_\theta$  为断线,  $R_v$  为实线)

方案 1 西热带气旋的  $\theta$  与  $\theta_0$ ,  $V_f$  与  $V_c$  的最佳相关尺度<sup>[8]</sup>均为 300 km。相应的  $R_\theta$  为 0.60,  $R_v$  为 0.82。 $R_v$  优于  $R_\theta$  (图 8a)。东热带气旋的  $\theta_f$  与  $\theta_0$  的最佳相关尺度为 350 km, 相应的  $R_\theta$  为 0.54。 $V_f$  与  $V_c$  的最佳相关尺度为 400 km, 相应的  $R_v$  为 0.63。 $R_v$  稍优于  $R_\theta$  (图 8b)。

在其他方案中, 东、西热带气旋的通风气流矢量都分别与其移动矢量密切相关(图略)。

## 5 结 论

综上所述, 得到如下一些结论。

(1) 应用无基本气流的无辐散正压模式可以模拟出西热带气旋打转、东热带气旋转向等类型的双热带气旋路径。

(2) 在双热带气旋的非对称流场中, 由西热带气旋(东热带气旋)的线性  $\beta$  效应产生的气旋性  $\beta$  涡旋的方位相位与由东热带气旋(西热带气旋)形成的非对称涡旋的方位相位相反(相同)。双热带气旋的相互作用主要是通过改变其配对热带气旋的非对称环流而实现的。

(3) 双热带气旋中每一热带气旋的通风气流矢量与其移动矢量均密切相关。

## 参考文献

- 1 Fujiwhara S. The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1921, 47(200): 287 ~ 293
- 2 Brand S. Interaction of binary tropical cyclones of the western north Pacific ocean. *J Appl Meteor*, 1970, 9(3): 433 ~ 441
- 3 王作述, 傅秀琴. 双台风相互作用及对它们移动的影响. *大气科学*, 1983, 7(3): 269 ~ 276
- 4 王玉清, 朱永. 正压无辐散模式中双涡的相互作用. *热带气象*, 1989, 5(2): 105 ~ 115
- 5 魏鼎文, 张捷迁. 双台风相互作用的流体动力学模拟实验研究. *中国科学(B 辑)*, 1982, 1: 87 ~ 94
- 6 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
- 7 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 ~ 116
- 8 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
- 9 Tian Yongxiang, Niu Xuexin. Effect of the linear beta term on movement and development of tropical cyclone. *Acta Meteor Sinica*, 1998, 12(1): 50 ~ 62
- 10 Tian Yongxiang, Niu Xuexin. Effect of the nonlinear term on movement and development of tropical cyclone. *Acta Meteor Sinica*, 1998, 12(2): 149 ~ 161

# INVESTIGATION ON INTERACTION OF BINARY TROPICAL CYCLONES

Tian Yongxiang Shou Shaowen

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044*)

## Abstract

The motion of binary tropical cyclones is numerically simulated using a nondivergent, barotropic model with no basic flow. The interaction of binary tropical cyclones is investigated applying the asymmetric theory. Each of binary tropical cyclones will mainly be displaced by the asymmetric flow passing its centre (i. e. the ventilation flow). This asymmetric flow is induced by the superposition of the asymmetric gyres created by the linear and nonlinear effects itself and the asymmetric vortex formed by its counterpart tropical cyclone.

**Key words:** Binary tropical cyclones, Interaction, Asymmetric vortex, Ventilation flow.