

文章编号: 1004-4965 (2004) 02-0167-09

双台风相互作用的数值研究

炎利军¹, 田永祥², 黄先香¹

(1. 广东省佛山市气象局, 广东 佛山 528000; 2. 南京气象学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 无基本气流的情况下,应用无辐散正压模式对初始呈西北-东南等方位的双台风相互作用进行数值研究,探讨了非对称理论在双台风相互作用中的应用。试验结果表明:双台风的运动特征能够运用非对称理论进行解释;非对称流函数场中,通风气流分别控制着双台风的移动,同时双台风的移动对其对应的非对称结构具有反作用。试验还表明,台风非对称结构内小尺度涡旋的强度及其绕台风中心逆时针旋转的快慢与台风路径的摆动关系密切;模式可以模拟出台风逆时针打转、“蛇形”摆动等异常移动路径。

关 键 词: 双台风; 相互作用; 数值模拟; 非对称理论

中图分类号: P435

文献标识码: A

1 引 言

双台风相互作用问题一直为气象界所关注。由于实际观测资料难以定义和除去大尺度环境场的影响,因此不少学者采用数值模拟方法研究双台风的相互作用。Demaria 等^[1]、王玉清等^[2, 3]和 Ritchie 等^[4]分别应用正压、斜压模式研究了双热带气旋(TC)相互作用的过程。结果表明,双TC的相对运动对两者间的初始距离、相对强度及相对地理位置十分敏感;β效应对双TC的相对运动具有显著影响。1980年代,Fiorino 等^[5]提出台风的非对称结构是影响台风移动的重要因子。此后,许多学者研究了台风结构与其移动的关系^[6, 7]。但是在双台风相互作用中考虑非对称结构对台风移动影响的研究目前还比较少。田永祥等^[8]运用非对称理论研究了初始方位呈东-西向双TC的相互作用,指出双TC相互作用主要是通过改变其配对TC的非对称环流而实现的。由于双台风的相互作用对于其初始相对地理位置是敏感的,所以本文中我们采用正压无辐散模式,对初始方位呈西北-东南向等类型的双台风相互作用作进一步的数值研究,以期能深入探讨非对称理论在分析双台风相互作用中的应用。

2 模式简介和方案设计

在无基本气流的假定下,无辐散正压模式的控制方程为

$$\frac{\partial \nabla^2 y}{\partial t} = -J(y, \nabla^2 y) - b \frac{\partial y}{\partial x} \quad (1)$$

式中 y 为扰动流函数(以下简称流函数)。方程(1)右端第一项为雅可比项;第二项为线性 β 项。方程表明:线性 β 项与非线性项的共同作用引起流函数随时间变化。

双台风初始涡度场^[8]取为

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

式中 r_A 为以台风 A 中心 (x_{OA}, y_{OA}) 为圆心的半径;而 r_B 为以台风 B 中心 (x_{OB}, y_{OB}) 为圆心的半径; r_{MA} 和 V_{MA} (r_{MB} 和 V_{MB}) 分别为台风 A (台风 B) 的最大切向风速半径及其对应的最大切向风速; b 为形状因子,试验中取为 1。

根据已知的双台风初始涡度场 $z(x, y)$ 数值求解泊松方程,得到初始流函数场 $y(x, y)$ 。然后,应用超张弛迭代法和蛙跃积分格式求解方程(1)。数值试验区域是一个纬向通道,其东西、南北方向各取 101 个网格点,格距取为 50 km。积分步长为 10 分钟,总积分时间为 3 个模式日。方程(1)中的 Rossby 参数 β 取在 25°N 的值,即采用了 β 平面近似。数值积分过程中,把总流函数 $y(x, y, t)$ 分解成轴对称流函数场 $y_s(x, y, t)$ 和非对称流函数场 $y_a(x, y, t)$ 。

首先做一个相同初始强度双台风的数值试验(试验 1),探讨应用非对称理论解释西北-东南向双台风的移动,然后用于与其它不同初始强度双台风试验(试验 2 和试验 3)作对比。试验初始时刻台风 A 的中心坐标取为格点(47, 55),台风 B 的中心坐标取为格点(55, 47);最大风速半径 r_{MA} 和 r_{MB} 均为 100 km;台风 A 的最大风速 V_{MA} 为 25 m/s。试验 1、2 和 3(图 1)中对应台风 B 的最大风速 V_{MB} 分别为 25、35 和 15 m/s。

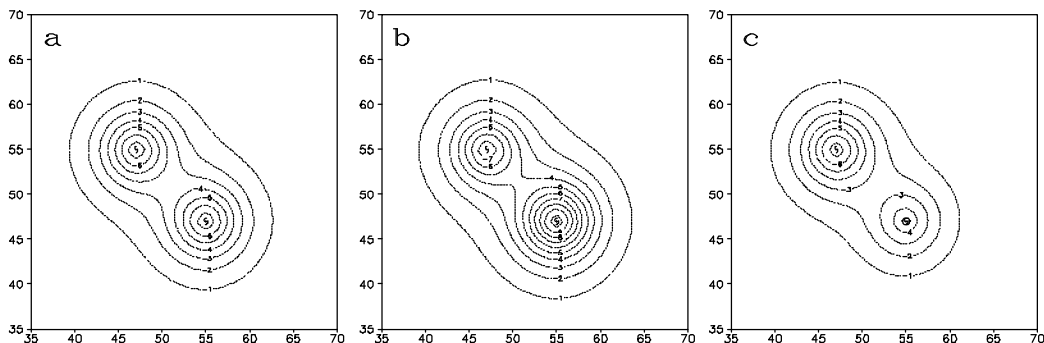


图 1 双台风初始流函数场 a. 试验 1; b. 试验 2; c. 试验 3。等值线间隔均为 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3 数值试验结果分析

3.1 双台风的路径特征

图 2 给出了双台风的路径。由图可见, 试验 1 中在台风 B 的影响下, 台风 A 前 36 小时向偏西方向移动, 在 37~50 小时期间, 台风 A 的路径经历了一次明显摆动, 此后, 台风 A 向西北方向移动。而在台风 A 的影响下, 台风 B 主要向东北方向移动, 运动轨迹呈蛇形摆动 (图 3)。试验 3 中, 在台风 B 影响下, 台风 A 前 25 小时向偏西方向移动, 随后经历了一次小的逆时针打转, 48 小时后转向西北移动。在台风 A 影响下, 台风 B 前 36 小时向东北偏北方向运动, 随后转向偏东移动。试验 2 中, 在较强台风 B 影响下, 台风 A 以西行为主, 摆动的曲率较小。而在较弱台风 A 影响下, 台风 B 向东北偏北方向运动, 轨迹多摆动。

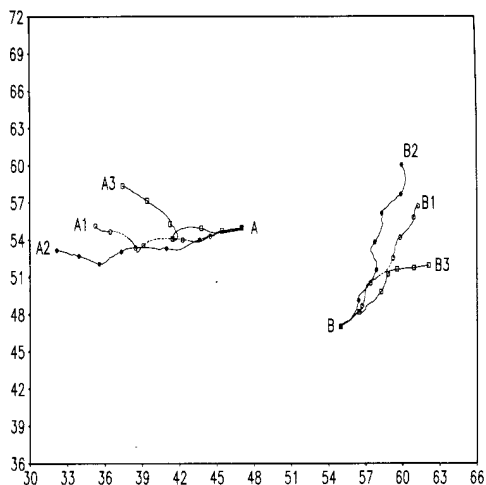


图 2 双台风的路径

A、B 分别对应台风 A、B 起点; 曲线 A1、B1, A2、B2 和 A3、B3 分别对应试验 1、2 和 3 路径; 标号间隔 12 h。

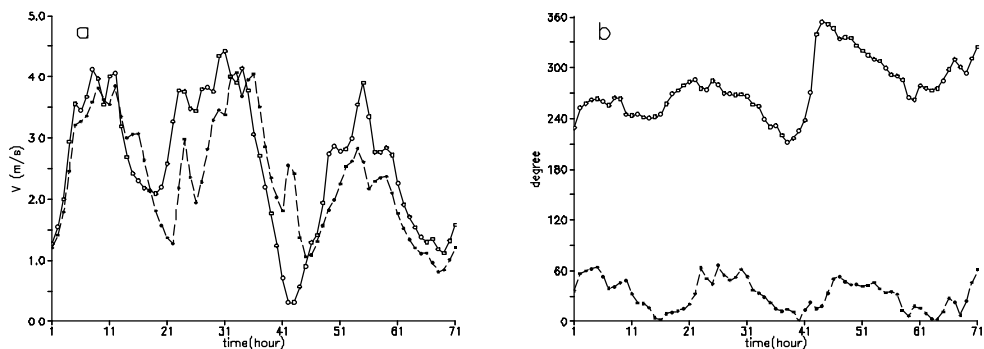


图 3 试验 1 中台风 A (实线) 和台风 B (虚线) 的移速 (a)、移向 (b) 变化曲线

3.2 双台风相互作用的分析

3.2.1 试验 1 中双台风的相互作用

在台风 A 的非对称流函数场中, 初始阶段台风 A 的东南方是由台风 B 形成的非对称气旋性涡旋, 其它方向相应的为反气旋性涡旋 (图 4a)。这种流场的配置是由台风 A 的线性 β 效应产生的非对称涡旋的方位相位与由东南向台风 B 形成的非对称涡旋的方位相位反向叠加造成的。台风 A 受到其偏北方向反气旋性涡旋和东南大尺度气旋性涡旋之间的偏东非对称气流作用, 向偏西方向移动 (图 2)。

在线性 β 效应和非线性项共同作用下, 台风 B 流函数的等值线呈 SE 象限密集, NW 象限疏松的非对称结构 (图 4 b)。非对称场中可见台风 B 中心附近等值线的西伸。第 12 小

时台风 B 所形成的非对称涡旋的外圈等值线产生一弱中心, 该中心逐渐与台风 A 线性 β 效应在西南偏西方向上生成的气旋性涡旋外围等值线合并, 从而台风 A 以南构成了一条近乎东西走向的带状低值区。此时, 台风以北为反气旋性涡旋, 受偏东非对称气流作用, 台风 A 向偏西方向移动 (图 4 b)。随着台风 A 向偏西、台风 B 向偏北方向移动, 两者的相对位置发生变化; 台风 A 的非对称流函数场中大尺度气旋性涡旋的中心强度迅速减弱。

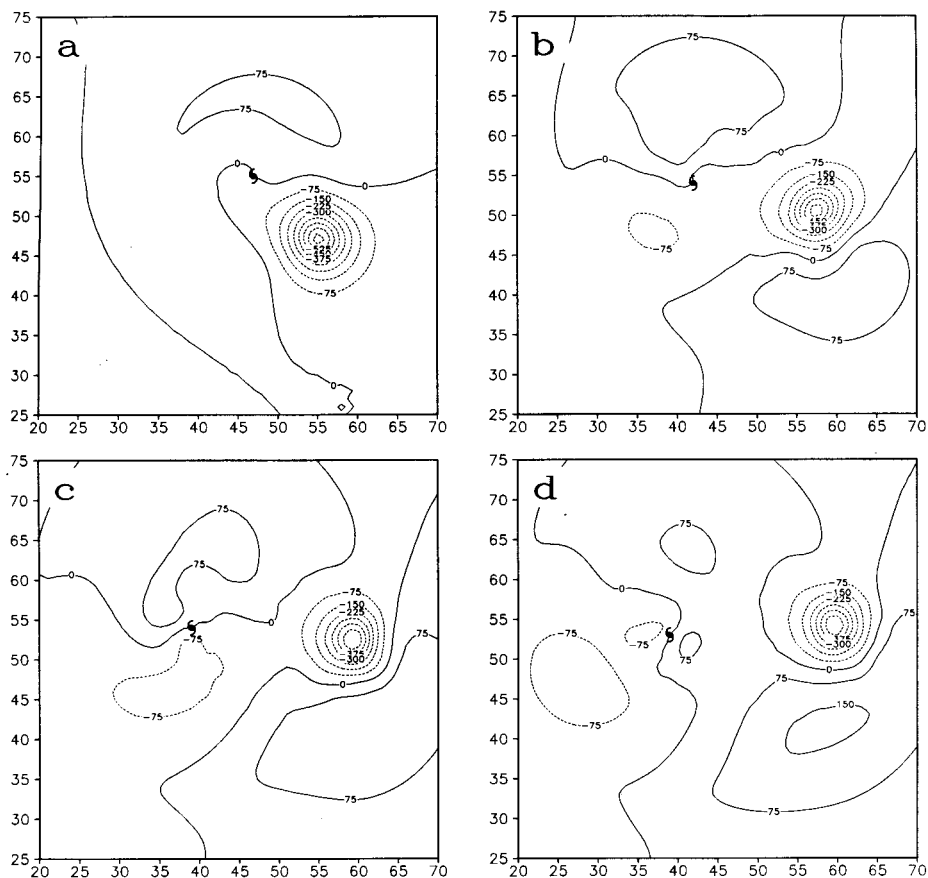


图 4 试验 1 中台风 A 的非对称流函数场 a.2 h; b.24 h; c.36 h; d.47 h。等值线间隔均为 $75 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

台风 A 第 36 小时已位于台风 B 以西 979 km 处, 此时的流场配置见图 4c 所示。与初始呈东-西向双台风的流场配置原理类似^[8], 由于此时台风 A 中心附近的大尺度非对称涡旋较弱, 流场形势有利于小尺度涡旋的生成。第 37 小时在台风 A 附近的大尺度涡旋中分离出小尺度涡旋 (图 5 a)。同时大尺度涡旋减弱, 且涡旋间的距离增加。小尺度涡旋绕台风 A 中心逆时针转动的过程中, 涡对间的非对称气流指向东南到偏东方向; 台风 A 附近大尺度涡旋间的非对称气流则指向西南偏西向, 两者的共同作用促使台风 A 逐渐转向西南偏南方向运动。并且在此过程中, 由于小尺度涡旋的方位相位和大尺度涡旋的方位相位趋于相反, 台风 A 作减速运动。第 42 小时台风 A 移速达极小值, 而移向为 270° (取正北方向为 0° , 沿顺时针增加), 即台风在转向处的移速最小, 这与实际观察现象是一致的 (图 3)。此后, 小尺度涡旋间的非对称气流存在向北的运动分量, 开始推动台风 A 向偏北方向运动 (图 5 b)。第 49 小时后, 小尺度涡旋并入大尺度涡旋。需要说明的是, 在小尺度涡旋绕台风 A 中心逆

时针转动期间, 台风 A 减速运动, 这使得台风 A 线性 β 效应产生的大尺度反气旋性 β 涡旋与台风 B 南部和西北部的反气旋性涡旋相叠加, 反气旋性涡旋的势力得以迅速增强; 随着双台风间距的增加, 台风 A 东北的反气旋性涡旋与其东南的反气旋性涡旋等值线逐渐合并, 从而在台风 A 以东构成了一条呈西北-东南向的带状高值区 (图 4d); 另外, 台风 A 以西是由其线性 β 效应所产生的大尺度气旋性 β 涡旋; 通过台风 A 中心的东南向非对称气流促使台风 A 向西北向运动。由上可见, 正是在非对称涡旋的作用下, 导致台风 A 减速; 减速的台风 A 所形成的的大尺度 β 涡旋与其周围的非对称涡旋相叠加, 从而快速建立了新的非对称环流结构, 引导台风 A 向西北移动。因此说, 台风的非对称结构控制了台风的移动; 同时, 台风的移动对台风的非对称结构具有反作用。

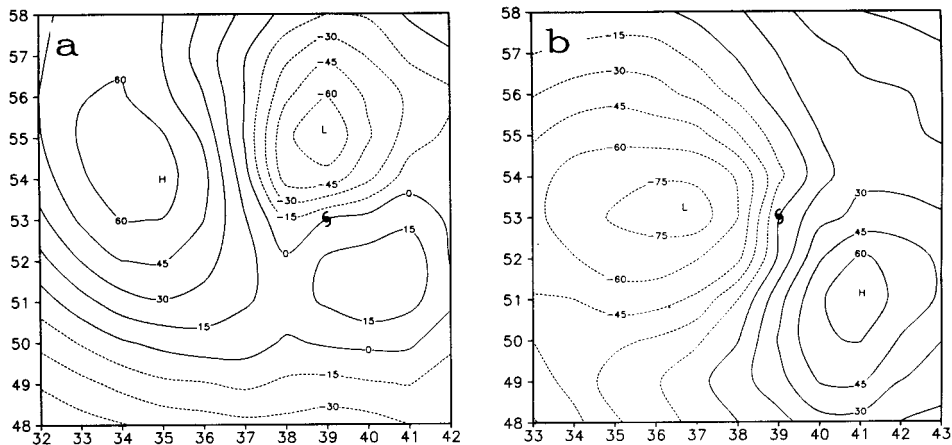


图 5 试验 1 中台风 A 非对称流函数场 a. 37 h; b. 45 h。等值线间隔均为 $15 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

台风 B 的非对称流函数场中, 初始阶段台风 B 西北方是由台风 A 形成的较强的非对称气旋性涡旋, 其它方向相应的为反气旋性涡旋 (图 6a)。在此流场配置下, 台风 B 受到西南非对称气流作用, 向东北方向移动。随着台风 B 向偏北、台风 A 向偏西方向移动, 两者的相对位置发生变化; 这种相对运动使得台风 B 的线性 β 效应产生的非对称气旋性涡旋的方位相位与台风 A 形成的非对称涡旋的方位相位趋于同向叠加, 从而导致了台风 B 的非对称流函数场中大尺度非对称涡旋强度增大。另外, 随着台风 A 相对台风 B 南移, 台风 B 以南的反气旋性涡旋与台风 A 的线性 β 效应产生的大尺度反气旋性 β 涡旋相叠加, 形成台风 B 以南或东南向势力较强的反气旋性涡旋。在台风 B 中心以西的气旋性涡旋与以南的反气旋性涡旋之间的西南非对称气流促使其进一步向东北方向移动。第 36 小时台风 B 位于台风 A 以东方向。由于通过东台风中心的非对称气流形势比较稳定, 所以对小尺度涡旋的产生和存在有明显的抑制作用。此时, 台风 B 的东南大尺度反气旋性涡旋向北伸展至台风 B 的东北方向, 并且台风附近产生了很弱的小尺度涡旋 (图略); 小尺度涡对间的反向非对称气流使得台风 B 作减速运动。由于小尺度涡旋在逆时针转动中方位相位与其周围的大尺度涡旋的方位相位趋于反相, 导致了小尺度涡旋的快速减弱消失; 此后, 随着台风 A 向西北方向移动, 由于非对称气流对地球涡度平流的作用, 台风 A 的中心强度减小。因此, 在台风 B 的非对称场中, 由台风 A 所形成的的大尺度非对称涡旋强度减弱; 同时, 造成台风 B 以南或东南向的反气旋性涡旋强度减小, 其外围的等值线向南或东南向收缩。此时, 由台风 A 形成的非对称气旋性涡旋从台风 B 的西南方延伸向其东北方向 (图 6b), 通过台风 B 中心为

西南、偏西的非对称气流,它导致台风 B 产生了路径上的一次摆动。

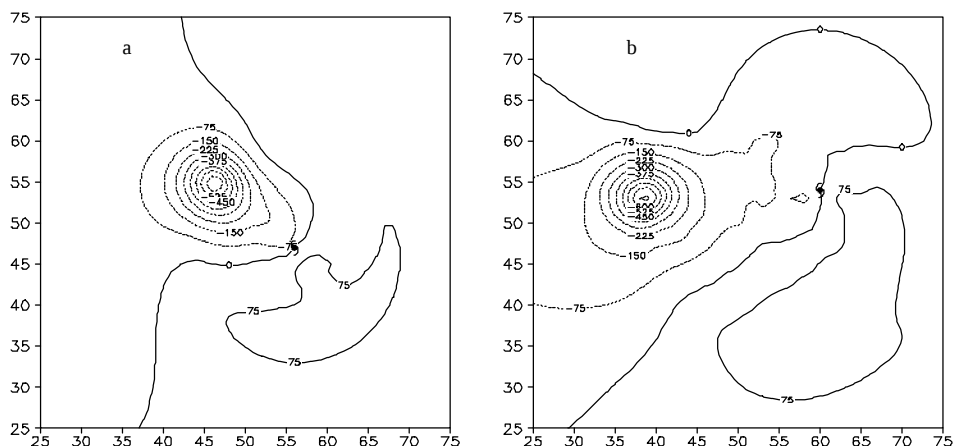


图 6 试验 1 中台风 B 的非对称流函数场 a.5 h; b.46 h。等值线间隔为 $75 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3.2.2 试验 3 中双台风的相互作用

试验 3 中双台风的相互作用与试验 1 相似。因为台风 B 的强度小于台风 A 的强度,所以由台风 A 的线性 β 效应产生的非对称涡旋的方位相位与由东南台风 B 形成的非对称涡旋的方位相位叠加后,使得台风 A 受到了较弱的偏东非对称气流作用。随着台风 B 向偏北方向移动,非对称气流对地球涡度平流的作用,使得台风 B 的中心强度减小,这导致台风 A 的非对称场中大尺度涡旋的强度进一步减小。此时,流场形势有利于小尺度涡旋的生成。第 34 小时在台风 A 附近的大尺度涡旋中分离出小尺度涡旋(图 7),同时大尺度涡旋减弱,且涡旋间的距离突然增加。小尺度涡旋强度大于大尺度涡旋,并绕台风 A 中心逆时针转动,这种二波型气流变得显著的过程与文献[9]中是一致的。小尺度涡旋的逆时针旋转导致通过台风中心的非对称气流逆时针旋转,而旋转的非对称气流促使台风 A 作逆时针打转运动。台风 A 转向阶段呈减速运动,移速极小值为 1.1 m/s 。

试验 3 中台风 B 在前 36 小时,始终受到西南向非对称气流的作用向东北向移动;此后,由西台风 A 形成的非对称气旋性涡旋从台风 B 以西伸向其偏北方向;台风 B 的偏南为一反气旋性涡旋(图略)。因此,台风 B 在偏西非对称气流的作用下向偏东方向移动(图 2)。在 43~54 小时期间,台风 B 附近有小尺度涡旋产生并绕台风 B 中心逆转。因为小尺度涡旋的强度远小于其周围的大尺度涡旋,所以小尺度涡旋间的非对称气流没有引起台风路径异常,只有轻微的移速振荡和移向摆动。

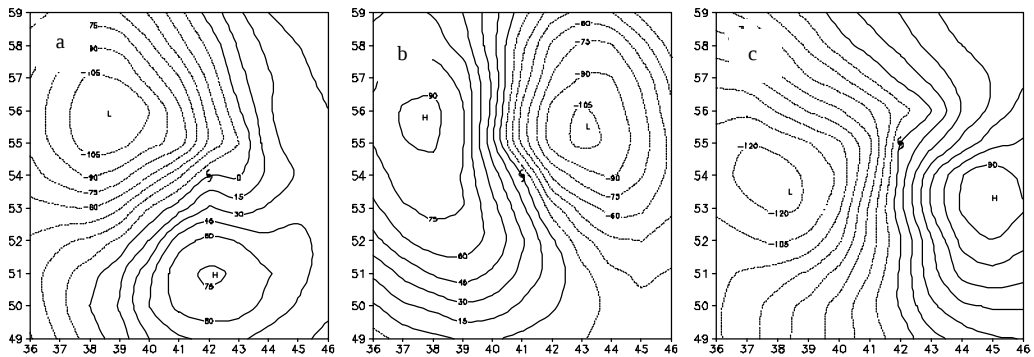


图7 试验3中台风A的非对称流函数场 a.34 h; b.42 h; c.46 h。等值线间隔为 $15 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$
符号L和H分别表示台风A中心附近的小尺度气旋性和反气旋性涡旋的中心。

3.2.3 试验对比分析

试验2中台风B的强度大于台风A的强度，其相互作用与试验1相似，不再赘述。主要区别是，试验2中双台风的移速较快；台风B移向逆时针偏转相对明显；台风A的移向以西行为主，较少摆动。

对比试验1、试验2和试验3中台风A非对称场随时间的演变过程可以看出，试验中小尺度涡旋的平均尺度分别为217 km、181 km和271 km。因此，小尺度涡旋绕台风A中心逆时针旋转所经过的圆形区域半径对应为217 km、181 km和271 km。求出的台风A的切向风速 $V(r)$ 分别为16.8 m/s、20.1 m/s和12.3 m/s。台风A以 $V(r)$ 引导小尺度涡旋的逆转。令小涡旋沿其运动半径运行一周所需要的时间为小尺度涡旋的活动周期 T 则 T 分别为22.5 h、15.8 h和38.6 h。由此可见，试验2（试验3）中小尺度涡旋绕台风A中心的逆时针转动较快（慢）。这表明，小尺度涡旋绕台风中心的快速逆时针旋转与台风A曲率较小的摆动密切相关。此外，台风B非对称场内的小尺度涡旋很弱，所以对台风的摆动影响很小，台风B的移动路径相对台风A的路径较平直。

3.3 通风气流与双台风移动的关系

为进一步了解通风气流与双台风移动的关系，本文采用了文献[10]给出的方法，在 r 为200~500 km ($\Delta r=50$ km) 的7种圆形区域，分别计算台风A和台风B的通风气流矢量，并求出了台风A和台风B的通风气流方向 q_l （速度 V_l ）与台风移向 q_c （移速 V_c ）的最佳相关尺度及其对应的方向（速度）的相关系数 R_θ (R_v)。

相关系数均达到了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平。由表1可见，随台风B初始强度的增加，台风A的最佳相关尺度保持为300 km，只有试验3中方向的最佳相关尺度为400 km，这应该与台风逆时针打转运动有关；300 km范围内，台风A的 R_v 随台风B强度的增加而增大。由表2可见，随台风B初始强度的增加，台风B的最佳相关尺度为300~350 km，并无显著变化。因此，模式给定的西北-东南向双台风，主要是围绕各台风中心、半径为300~400 km的圆形区域内的通风气流分别控制着台风的移动。

表 1 通风气流矢量与台风 A 移动矢量的最佳相关尺度和相应的相关系数

试验类别	速度的相关		方向的相关	
	最佳的 r / km	R_v	最佳的 r / km	R_θ
试验 1	300	0.75	300	0.85
试验 2	300	0.80	300	0.74
试验 3	300	0.52	400	0.54

表 2 通风气流矢量与台风 B 移动矢量的最佳相关尺度和相应的相关系数

试验类别	速度的相关		方向的相关	
	最佳的 r / km	R_v	最佳的 r / km	R_θ
试验 1	350	0.62	350	0.52
试验 2	300	0.71	350	0.68
试验 3	300	0.72	300	0.82

4 结语和讨论

本文在前人研究的基础上，应用无辐散正压模式分析了初始方位呈西北-东南向双台风相互作用中，动力过程如何影响台风内部的非对称结构及其移动。此外我们也数值模拟了初始呈东北-西南向的双台风和其他方位类型的双台风相互作用（文略）。一系列试验表明，双台风的初始方位、强度和距离的不同，对应的移动路径也不尽相同。但是，均可以用非对称理论解释台风移动中双台风的相互影响。因此，得到如下一些结论：

（1）双台风的运动特征能够运用非对称理论进行解释；非对称流函数场中，通风气流控制着台风的移动；同时，台风的移动对其对应的非对称结构具有反作用。

（2）双台风相互作用中，台风非对称结构内小尺度涡旋的强度及其绕台风中心逆时针旋转的快慢与台风路径的摆动关系密切。

（3）模式可以模拟出双台风相互影响下的台风逆时针打转、“蛇形”摆动、转向等类型的异常移动路径。

由于本文采用的是简单正压无辐散模式，没有考虑热力结构^[11, 12]和水汽分布等对台风非对称结构的影响，因此所得到的结论是很初步的。

参 考 文 献：

[1] DEMARIA M, CHAN J C L. Comments on “A numerical study of the interactions between two tropical cyclones”[J]. *Mon Wea Rev*, 1984, **112**: 1643-1645.

[2] 王玉清, 朱永提. 正压无辐散模式中双涡的相互作用[J]. *热带气象*, 1989, **5**: 105-115.

[3] 王玉清, 朱永提. 双热带气旋相互作用的机制分析及数值研究[J]. *大气科学*, 1992, **16**: 659-668.

[4] RITCHIE E A, HOLLAND G J. On the interaction of tropical-cyclone-scale vortices. Part II: Discrete vortex pathes[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1993, **119**: 1363-1379.

[5] FIORINO M, ELSBERRY R L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion[J]. *J Atmos Sci*, 1989,

46 : 975-990.

- [6] 李超凡. 台风涡旋的结构及其与台风运动的关系[J]. 热带气象学报, 1996, 12 : 314-323.
- [7] 袁金南, 王国民. 关于台风非对称结构与台风路径的数值分析[J]. 热带气象学报, 1997, 13 : 208-216.
- [8] 田永祥, 寿绍文. 双热带气旋相互作用的研究[J]. 气象学报, 1998, 56 : 584-593.
- [9] CHAN J C L, CHEUNG K K W. Characteristics of the asymmetric circulation associated with TC motion[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1998, 65 : 183-196.
- [10] 田永祥. 斜压涡旋中的通风气流与热带气旋移动的关系[J]. 气象学报, 1996, 54 : 83-94.
- [11] 贺海晏. 台风移动规律的研究 I : 非绝热加热与水平温度分布的影响[J]. 热带气象学报, 1995, 11 : 1-9.
- [12] 雷小途. 非绝热加热对热带气旋非对称结构影响的数值试验[J]. 热带气象学报, 1998, 14 : 208-217.

A NUMERICAL STUDY OF THE INTERACTION OF TWIN TYPHOONS

YAN Li-jun¹, TIAN Yong-xiang², HUANG Xian-xiang¹

(1. Foshan Meteorological Bureau, Guangdong 528000, China ;

2. Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Using a nondivergent barotropic model with no basic flow the interaction of twin typhoons is numerically simulated, in order to understand how asymmetric theory influences on interaction between the two typhoons. Results show that the asymmetric theory can explain the motional features of binary typhoons. Each of the twin typhoons will be governed mainly by the ventilation flow passing its center. On the other hand, the movement of twin typhoons can react to their asymmetric structures. In addition, the rotary velocity of small scale gyres and its strength in the asymmetric structure of typhoons have a close relation to the meander of typhoon's track. This simple model can present the singular tracks of typhoons, such as snake meandering and moving around counterclockwise.

Key words: twin typhoons; interaction; numerical simulation; asymmetric theory