

东移偶极子与台风涡旋的相互作用*

罗哲贤

(南京气象学院, 南京, 210044)

摘 要

用 β 平面准地转正压模式实施 8 组试验, 分析东移偶极子与台风涡旋的相互作用。结果表明: 这种相互作用可以引起台风环流 1 波非对称结构向 2 波非对称结构的转换; 引起台风涡旋随时间衰减的速度显著变慢; 引起沿西北方向移动的正常路径向北折转向或打转等异常路径的转化。

关键词: 偶极子, 热带气旋, 涡旋, 相互作用。

1 引 言

大尺度波动和大尺度涡旋是地球大气中两类富有特征的运动形态。波-波相互作用的研究已有很多^[1]。涡-涡相互作用的研究至今还较少。一般限于台风与其边缘区域中尺度涡旋的作用^[2]、双台风的作用^[3,4]或高空冷涡与台风的相互作用^[5,6]。本文将初步分析另一类涡-涡相互作用, 即东移偶极子与偏西北移动台风涡旋的相互作用。

偶极子与台风涡旋的特征水平尺度均多为几百公里至 1000 km 左右, 移动速度均比西风带中槽脊移动速度慢, 为 10 的零次幂 m/s。作为移动坐标中正压涡度方程的解析解, 偶极子沿纬圈向正东方向移动, 移动时能量并不频散。在无环境流场条件下, 台风涡旋向偏西北方向移动, 移动过程中能量频散, 强度衰减。设想初始时刻偶极子位于台风涡旋的西北方向, 两者之间相距一定距离, 如 1500 km 左右。若不计及环境流的作用, 随着时间的推移, 两者之间的距离会逐渐减小, 理应随之产生包括碰撞在内的涡-涡相互作用。我们将着重分析这种相互作用对台风涡旋的强度、结构和路径的影响。

2 模式与试验概述

取 β 平面准地转正压涡度方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + J(\psi, \nabla^2 \psi) + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中 ψ 为地转流函数, $\beta = df/dy$, f 为科氏参数。 β 平面中线处 $\mathcal{Q} = 35 \text{ N}$ 。

式(1)差分格式的计算区域为 4000 km \times 4000 km, 计 151 \times 151 个格点。水平格距为

* 初稿时间: 1996 年 10 月 18 日; 修改稿时间: 1997 年 7 月 16 日。

资助课题: 国家自然科学基金(49575259)。

26. 667 km。时间步长为 10 min。

南北边界处, 令 $\psi = 0$; 东西边界用循环边条件。

$t = 0$ 时, 令

$$\Psi(x, y, 0) = \Psi_1(x, y, 0) + \Psi_2(x, y, 0) \quad (2)$$

这里, $\Psi_1(x, y, 0)$ 的表达式取自文献[7], 即

$$\Psi_1(x, y, 0) = c \sin \theta \begin{cases} \frac{1}{k^2 c} \frac{J_1(kr)}{J_1(k)} - (1 + \frac{1}{k^2 c})r, & r < 1 \\ \frac{K_1(r/\frac{c}{c})}{K_1(1/\frac{c}{c})} & r > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\theta = \text{tg}^{-1}[(y - y_{01})/(x - x_{01})]$, $r = \sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}$, (x_{01}, y_{01}) 为偶极子中心的坐标。 c 为偶极子向正东方向的移动速度, k 为 $r < 1$ 区域内的波数(r 为无量纲量)。 J_1, K_1 分别为第一类 Bessel 函数和第二类变型 Bessel 函数。这里, 令 $k = 3.9226$, $c = 4.69 \text{ m/s}$ 。

式(2)中, $\Psi_2(x, y, 0)$ 由下式决定:

$$\xi_2(x, y, 0) = \nabla^2 \Psi_2(x, y, 0) \quad (4)$$

其中,

$$\xi_2(x, y, 0) = (2V_m/r_m)(1 - 0.5(r/(sr_m))) \text{EXP}(1 - (r/(sr_m))) \quad (5)$$

式中, $r = \sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}$, (x_{02}, y_{02}) 为台风中心的坐标。 V_m 为最大风速, r_m 为最大风速半径, s 为非对称参数。在台风环流的第 1, 2, 3, 4 象限, s 分别取值为 1.1, 1.0, 0.9, 和 1.0。

由 $\Psi_1(x, y, 0)$ 可求出 $\xi_1(x, y, 0)$ 。 $t = 0$ 时,

$$\xi(x, y, 0) = \xi_1(x, y, 0) + \xi_2(x, y, 0) \quad (6)$$

$\xi(x, y, 0)$ 的分布如图 1a 所示。图 1a 上, 偶极子中心与台风中心之间相距约 1250 km。偶极子中正、负中心的相对涡度值分别为 $1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 和 $-1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。台风的最大风速 $V_m = 20.0 \text{ m/s}$, $r_m = 200 \text{ km}$ 。台风中心的相对涡度值为 $5.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

偶极子的细致结构如图 1b 所示。偶极子的半径为 500 km, 北侧气旋环流, 南侧反气旋环流。在正、负中心之间等值线密集处, 最大风速约为 18 m/s。

若令 $\xi(x, y, 0) = \xi_1(x, y, 0)$, 即令台风涡旋不存在, 只有偶极子。以此为初值积分 6 个模式日, 偶极子几乎以匀速向正东方向移动(图 1c)。

若令 $\xi(x, y, 0) = \xi_2(x, y, 0)$, 即令偶极子不存在, 只有台风涡旋。以此为初值积分 6 个模式日, 台风向西北方向移动(图 1d)。

由图 1c, 1d 的结果推断, 若令 $\xi(x, y, 0) = \xi_1(x, y, 0) + \xi_2(x, y, 0)$, 以此为初值场, 那末, 在 6 个模式日的积分过程中, 台风涡旋将会与东移偶极子逐渐靠近甚至碰撞, 显示

出两者的相互作用。

文中设计了 8 个试验来分析这种相互作用。其中, 试验 A, B, C, D 中, 有相互作用; 作为对比, 试验 A, B, C, D 中, 无相互作用(只有台风涡旋)。试验 A, B, C, D 中偶极子的初始流型相同, 均由式(3)求出; 偶极子的中心位置相同; 台风最大风速均为 20 m/s。台风中心位置也相同。不同的是最大风速半径取值不同。分别令 r_m 为 200 km(试验 A), 150 km(试验 B), 125 km(试验 C) 和 100 km(试验 D)。在试验 A, B, C, D 中令偶极子不存在, 只有台风涡旋, 则分别为试验 A, B, C 和 D。

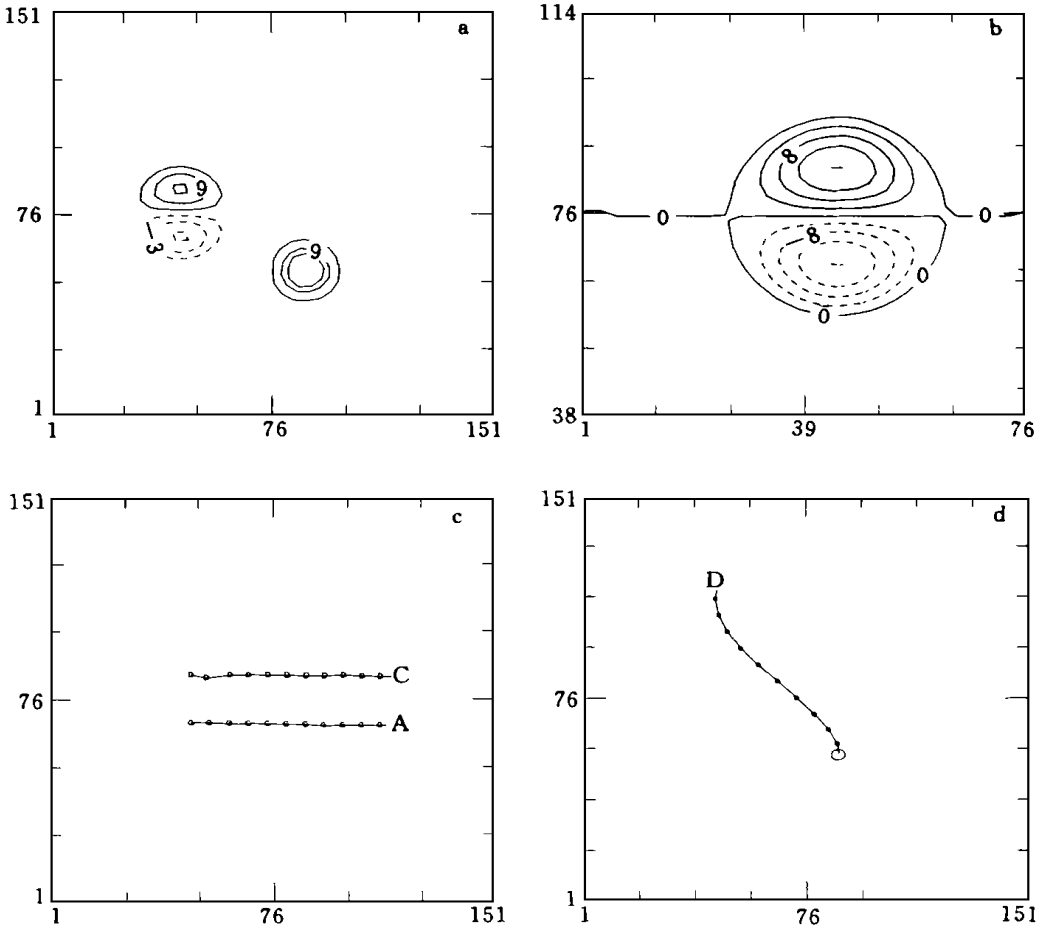


图 1 相对涡度初始场及涡旋移动路径

(a. 试验 A 相对涡度初始场。等值线间隔 $\Delta\xi = 6.0$ (无量纲量), $\Delta\xi = 1$ 相应于有量纲量 $0.1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; b. 偶极子流型相对涡度初始场, $\Delta\xi = 4.0$; c. 无台风涡旋, 偶极子正、负涡度中心移动路径; d. 试验 A 台风涡旋中心移动路径。图框数字为格点号。图 1a, 1c, 1d 图框代表 $4000 \text{ km} \times 4000 \text{ km}$; 图 1b 图框代表 $2027 \text{ km} \times 2027 \text{ km}$ 。图 1c, 1d 中, 每隔 12 h 标注一次“·”)

3 涡旋相互作用对台风强度的影响

在无环境流的情况下, 由于构成台风涡旋的罗斯贝波动成分不断向外频散能量, 致使

涡旋能量不断散失, 涡旋强度不断衰减。

不存在东移偶极子和台风涡旋的相互作用时, 经过 6 个模式日, 台风中心相对涡度衰减至初始时刻的 52%, 50%, 50% 和 50% (图 2, 试验 A, B, C, D)。

引进涡旋相互作用后, 这种衰减的速度变慢。经过 6 个模式日, 台风中心相对涡度衰减至初始时刻的 63%, 66%, 70% 和 62% (图 2, 试验 A, B, C, D)。

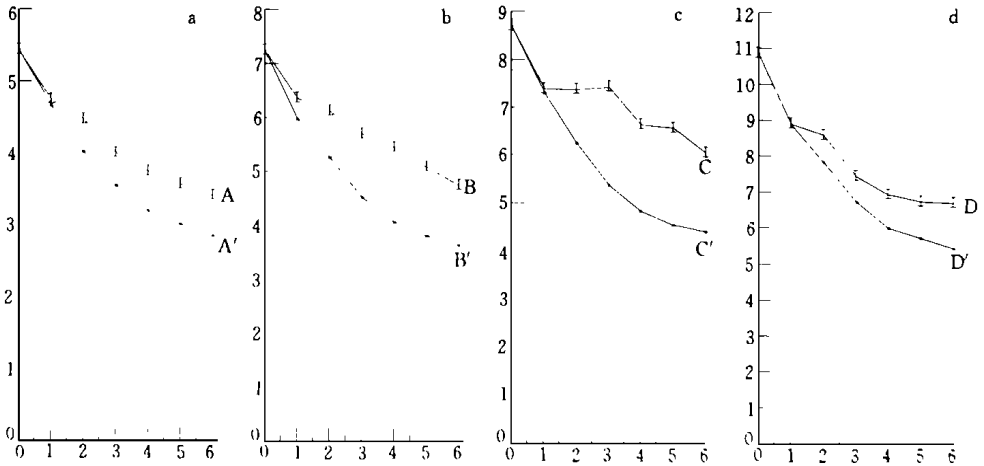


图 2 台风中心相对涡度随时间的变化

(a. 试验 A, A'; b. 试验 B, B'; c. 试验 C, C'; d. 试验 D, D'. 横坐标为模式日, 纵坐标为台风中心相对涡度值。单位: 10^{-4}s^{-1} 。每隔 1 个模式日标注一次“·”。字母 L 代表相互作用)

试验 A, B, C, D 中, 台风中心相对涡度减至初始值的 63%, 66%, 70% 和 62% 所需要的时间分别为 3.5, 2.7, 2.5 和 3.0 d (图 2), 约为 6 个模式日的一半。就此角度而言, 涡旋相互作用使台风涡旋强度衰减的速率减小约一半。

4 涡旋相互作用对台风结构的影响

不计环境流的作用, 若初始台风环流为同心圆对称结构, 在 β 项和非线性平流的共同作用下, 这种对称结构将逐渐演变为东北象限相对涡度等值线密、西南象限等值线疏的非对称结构。此后, 在向西北方向移动的过程中, 这种非对称结构始终维持^[8]。台风环流等值线沿不同方位的疏密程度可以用一些参数来描述。如以这些参数为纵坐标, 以方位角 $0 \sim 360$ 为横坐标, 那末, 对这种东北象限密、西南象限疏的非对称结构而言, 这些参数随方位角的变化曲线将显示出 1 波的特征。故称之为 1 波非对称结构。

试验 A, B, C, D 中, 不存在涡旋相互作用, 台风环流均具有 1 波非对称结构(图略)。这与文献[8]的结果是一致的。

涡旋相互作用引进以后, 不同的非对称结构演变特征表现出来了。现以试验 B 为例讨论。

试验 B 中, 每隔 12 个模式小时输出一张台风环流区域相对涡度分布图。6 个模式日共输出 12 张图。在每张图上, 从台风中心出发, 分别沿正东、东北、正北、西北、正西、西南、

正南、东南、正东方向画一线段。记这 9 个方位为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9。图 3 横坐标的数字代表这 9 个方位。这些线段与台风环流相对涡度最外一圈闭合等值线相交。交点与台风中心之间的距离大小, 反映了相应方位等值线的疏密程度。若距离大(小), 则沿相应方位等值线疏(密)。图 3 的纵坐标为交点与台风中心之间的距离。

由图 3 可见, 在第 0.5, 1.0 个模式日, 台风环流等值线疏密程度随方位角的变化具有 1 波特征(图 3a)。这时, 偶极子与台风涡旋之间相距较远, 涡旋相互作用还不明显。随着偶极子的东移, 涡旋相互作用开始显示出来。在第 1.5 个模式日(图 3b, 曲线 C), 开始出现 2 波结构, 但振幅很小。在第 2.0 个模式日, 2 波振幅明显增大(图 3b, 曲线 D)。此后, 一直到第 6.0 个模式日, 2 波结构均能维持(图 3c—3f)。另外, 在 2 波振幅明显增大的第 2.0 个模式日以后 24 h, 台风路径转向。

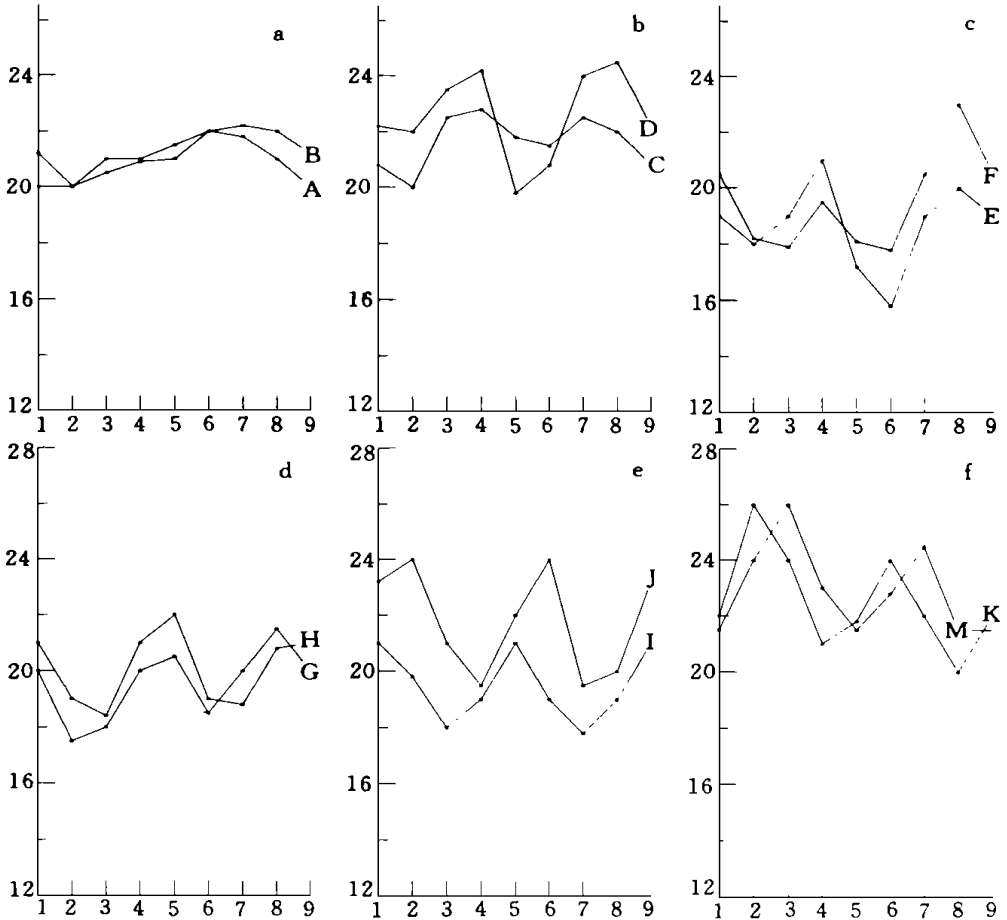


图 3 试验 B 中台风环流等值线疏密程度随方位角的变化

(横坐标 1, 2, 3, 4, ……7, 8, 9 分别代表正东、东北、正北、……正南、东南、正东。纵坐标描述等值线疏密程度的参数(见正文说明)。曲线上 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, M 分别代表第 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 个模式日)

上述结果说明: 东移偶极子与台风涡旋的相互作用可以激发台风环流 1 波非对称结构向 2 波非对称结构的转化。这种转化似乎可以作为台风路径变化的一种先兆现象。

5 涡旋相互作用对台风路径的影响

无涡旋相互作用时, 台风移动有两个特点。第一, 都向西北方向移动。第二, 台风移向、移速对最大风速半径 r_m 的取值变化不太敏感。4 组不同的 r_m 取值的台风路径彼此相似(图 4a)。

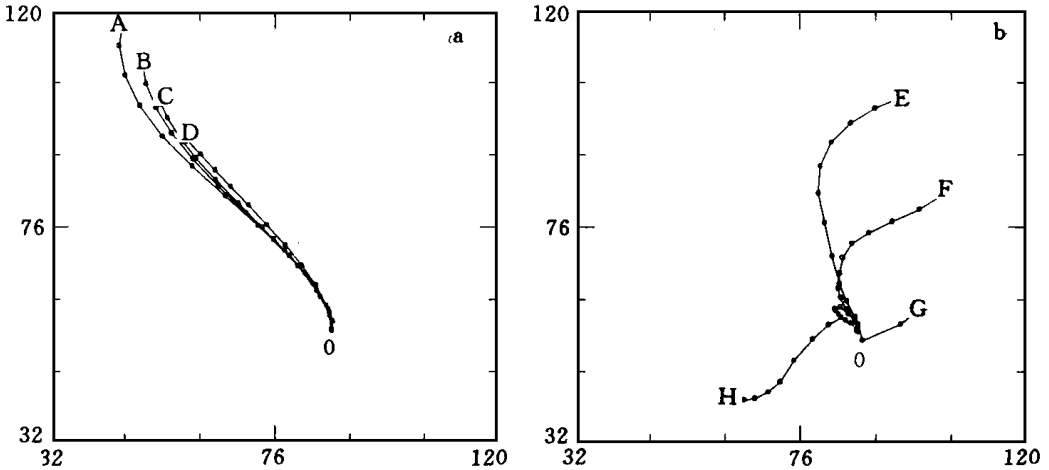


图 4 8 个试验中台风移动路径

(“0”代表台风中心初始位置。每隔 12 h 标注一次“·”)。a. 无涡旋相互作用。试验 A (OA), 试验 B (OB), 试验 C (OC), 试验 D (OD); b. 有涡旋相互作用。试验 A (OE), 试验 B (OF), 试验 C (OG), 试验 D (OH)

有涡旋相互作用时, 台风移动也有两个特点。第一, 不再只向西北方向移动, 或向东北, 或向偏东, 或向西南。第二, 台风移向、移速对最大风速半径的取值十分敏感(图 4b)。

6 涡旋相互作用对偶极子的影响

涡旋相互作用使偶极子的对称结构破坏, 强度和频率特征不再维持, 不再沿纬圈向正东方向移动。

图 5 列出了有涡旋相互作用时偶极子气旋涡旋及反气旋涡旋的移动路径。与无涡旋相互作用的情况(图 1c)相比, 可见两者存在十分清楚的差别。无论是气旋涡旋, 还是反气旋涡旋, 它们都不再向正东方向移动。而且它们之间的分离现象非常明显, 这意味着偶极子的初始结构已完全破坏了。

7 结果和讨论

本文初步分析了东移偶极子涡旋与台风涡旋之间的非线性相互作用。不存在这种相互作用时, 台风涡旋向西北方向移动; 偶极子维持对称结构, 始终向正东方向移动。引进这

种相互作用后,台风涡旋偏离了正常路径。随着台风空间尺度的变化,或向东北,或向偏东,或向西南移动。同时,台风移速也发生了变化。

关于涡旋之间相互作用影响台风路径的机理问题,据本文计算结果,有两点值得注意。第一,涡旋相互作用引起台风非对称结构的变化,从沿方位角方向的 1 波非对称转换为 2 波非对称。一旦这种转换发生,台风路径随后即发生移向变化。这与陈联寿等^[9]研究结果相似。第二,涡旋相互作用激发出一种由台风涡旋和反气旋涡旋构成的新的拟序结构。这种拟序结构本身的动力学性质决定了它会向东北方向移动而不是向西北方向移动。这是台风涡旋向东北方向移动的直接原因。对此,已另作讨论^[10]。

本文有三点局限。第一,台风移动是一个非线性系统的行为,与系统参数关系密切。这些参数包括:偶极子与台风涡旋的相对位置,偶极子强度,台风涡旋强度,台风结构非对称参数和松紧参数,台风空间尺度等。这里只分析了 4 组不同台风空间尺度的取值对路径的影响。至于其它参数的改变会有什么作用,我们还不清楚。第二,实际大气中存在环境流场,向偏西北方向移动的台风所处纬度较少超越 30°N。这里未考虑环境场,试验 A, B, C, D 的台风一直向西北方向移动,所处纬度超过 30°N。今后应分析环境场的作用。第三,没有涉及实际大气中偶极子与台风涡旋相互作用的问题,或者与之相类似的问题。这些都有待继续研究。

参考文献

- 1 李崇银,黄荣辉,杨大升,倪允琪. 近几年中国大气动力学的主要进展. 气象学报, 1995, 53(3): 26~270
- 2 Chen lianshou and Luo Zhexian. Effect of the interaction of different scale vortices on the structure and motion of typhoons. Adv Atmos Sci, 1995, 12(2): 207-214
- 3 王玉清,朱永. 双热带气旋相互作用的机制分析及数值模拟研究: 数值模拟. 大气科学, 1992, 16(6): 659~668
- 4 高拴柱,徐祥德,陈联寿. 双台风间接相互作用的数值模拟试验及其分析. 见: 05-906-07 课题组. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 第二分册, 179~184
- 5 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 128~139
- 6 赖碧波,陈联寿,徐祥德. 冷涡对 9009 号台风相互作用的数值模拟. 见: 05-906-07 课题组. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 第二分册, 165~167
- 7 McWilliams J C, et al. Numerical studies of barotropic modons. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 1981, 5: 219-238
- 8 罗哲贤. 能量频散对台风结构和移动的作用. 气象学报, 1994, 52(2): 149~156
- 9 陈联寿等. 非对称结构与台风移动的若干联系. 见: 05-906-07 课题组. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 第二分册, 371~374
- 10 罗哲贤. 涡旋相互作用和拟序结构的形成. 气象学报, 1998, 56(4): 416~423

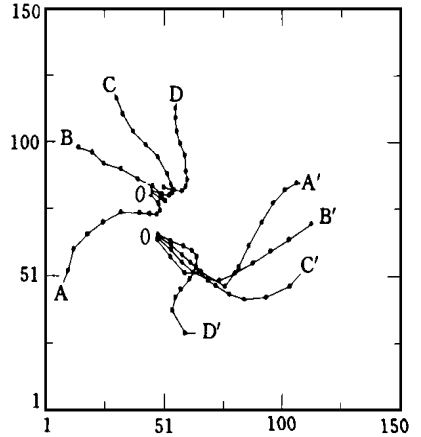


图 5 试验 A, B, C, D 中, 偶极子正负相对涡度中心的移动路径 (OA、OB、OC、OD 为气旋涡度中心路径; OA', OB', OC', OD 为反气旋涡度中心路径。每隔 12 h 标注一次位置。图框数字为格点号, 图框范围为 4000 km × 4000 km)

INTERACTION BETWEEN EASTWARDS MOVING DIPOLES AND TYPHOONS

Luo Zhexian

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

Abstract

In order to study the interaction between eastwards moving dipoles and typhoons, eight numerical experiments are performed with a beta-plane quasigeostrophic barotropic vorticity equation model. Results show that the interaction can create the transformation from the typhoon asymmetric structure with one wavenumber to that with two wavenumber, that it can decrease the rate obviously at which the intensity of typhoons decays, and that it can also induce the transition from typhoon normal tracks to unnormal ones, such as the abrupt northeastward recurving or anticlockwise moving and so on.

Key words: Dipole, Typhoon, Vortex, Interaction.