

副热带高压南侧双台风相互作用的数值研究^{*}

罗哲贤 马镜娴

(南京气象学院, 南京, 210044)

摘 要

用一个正压原始方程模式,对 Carr 和 Elsberry 于 20 世纪 90 年代后期提出的双台风相互作用的概念模式进行了数值研究。结果证实了该概念模式的合理性。同时指出:在一定的参数范围,副热带高压南侧东风气流中的双台风作用,可以激发出台风路径的移向突变和移速突变。

关键词: 副热带高压, 双台风, 相互作用, 概念模式, 数值试验。

1 引 言

长期以来,藤原效应的概念模型在分析双台风相互作用时被广泛应用。该模型的要点是:当两个台风之间的距离 d 小于临界值 d_c 时,两个台风一边互旋,一边逼近,直至合并。这个模型不能解释 $d > d_c$ 条件下双台风往往仍然存在相互作用的观测现象。后来,陈联寿^[1]首先指出, $d > d_c$ 时,两个台风之间可以通过环境场起着间接作用,这是一个直接、间接作用的概念模型。董克勤等^[2]深入分析了水平风切变环境场和藤原效应的共同作用。王玉清、朱永禔^[3]得到了一系列双台风作用的有新意的数值结果。20 世纪 90 年代前期, Lander 和 Holland^[4]根据 1945 ~ 1988 年西太平洋双台风的观测事实,提出了一个非线性分支的概念模型。最近, Carr 和 Elsberry^[5]分析了 1989 ~ 1995 年西太平洋双台风作用的多个个例,进一步提出了直接、半直接和间接作用的新的概念模型。该模型中,台风能量频散生成系统与副热带高压的作用占据着核心的环节。

注意到文献[5]限于天气学的观测分析,没有数值研究,本文将针对这个新的概念模型,提出清晰的数值证据。截止目前,尚未见到关于该模型的数值结果发表。

副热带高压脊和一个台风的相互作用问题, Evance 和 Holland^[6]用浅水模式积分 3 个模式日对此做过研究。结果表明:模式大气台风路径属正常路径。Carr 和 Elsberry 的概念模型中,存在一个副热带高压和两个台风的相互作用。在此场合,本文数值结果显示出异常的台风路径。因而,副热带高压南侧东风气流中的双台风作用,是路径复杂化、异常化的原因之一。本文结果可以为这类异常路径的预测提供科学认识。

^{*} 初稿时间: 2000 年 1 月 6 日; 修改稿时间: 2000 年 10 月 15 日。
资助课题: 国家自然科学基金(49775263)。

2 模式概述

取正压原始方程模式的通量形式如下

$$\frac{\partial u}{\partial t} - v^* q + \frac{\partial}{\partial x}(K + gh) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u^* q + \frac{\partial}{\partial y}(K + gh) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中, $u^* = hu, v^* = hv, q = \frac{\xi + f}{h}$ 为位涡度, $K = \frac{u^2 + v^2}{2}$ 为动能。其它为惯用符号。

关于边条件, 在东西边界, 用循环边条件。在南北边界 $y = 0, D$ 处, 令

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(K + gh) = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u^*}{\partial x} = 0$$

关于初条件, 令

$$h(x, y, 0) = h_G(y, 0) + h_W(x, y, 0) + h_E(x, y, 0) \quad (4)$$

其中

$$h_G(y, 0) = - \left(\frac{f h_0}{f_0} \sin \frac{2\pi y}{w} \right) - \frac{\beta h_0 w}{2\pi f_0} \cos \frac{2\pi y}{w} \quad (5)$$

$$h_W(x, y, 0) = H_1 - h_G \left(1 - \exp\left(-\frac{a}{r_W}\right) \right) \quad (6)$$

$$h_E(x, y, 0) = H_2 - h_G \left(1 - \exp\left(-\frac{a}{r_E}\right) \right) \quad (7)$$

式(4)~(7)中, 下标 G, W 和 E 分别代表副热带高压脊、西台风和东台风。式(5)描述的是一个理想的副热带高压脊^[6]。参数取值参照文献[6]: $f = 2\Omega \sin \varphi, f_0 = 2\Omega \sin \varphi_0, \varphi = 20^\circ \text{N}, \beta = (2\Omega/a) \cos \varphi, h_0 = 50 \text{ m}, h_c = 500 \text{ m}, H = 5000 \text{ m}, H = H_1 + H_2$ 。w 为南北边界之间的距离, 令 $w = 4452 \text{ km}$ 。a = r_m^b, r_m 为最大风速半径, b 为形状参数。令 $r_m = 100 \text{ km}, b = 1.5$ 。r_W = $\sqrt{(x - x_{W0})^2 + (y - y_{W0})^2}$, r_E = $\sqrt{(x - x_{E0})^2 + (y - y_{E0})^2}$, (x_{W0}, y_{W0}), (x_{E0}, y_{E0}) 分别为初始场上西台风和东台风的中心坐标。

初始环境风场根据地转风平衡, 从初始副热带高压脊的高度场求得。初始台风环流的风场根据梯度风平衡, 从初始台风高度场求得。采用 Nitta-Hovermale 动力初始化方案。

计算区域为 4452 km × 4452 km, 计 201 × 201 个格点, $d = \Delta x = \Delta y = 22.26 \text{ km}$ 。采用 Arakawa C-grid 方案和 Arakawa-Lamb 守恒格式。时间步长 15 s。

文中做了 3 类试验: A 类: 无副热带高压脊时双台风相互作用; B 类: 副热带高压脊南侧存在一个或两个台风; C 类: 副热带高压脊不同强度的影响。所有试验均积分 5 个模式日。

3 主要结果

3.1 双台风合并的临界点现象

A类6个试验中,只有两个台风。两个台风中心的初始距离列于表1。

表1 试验 A₁ ~ A₆ 中,两个台风的初始距离和96 h 的距离(km)

试验号	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
初始距离	267	312	356	400	600	800
96 h 的距离	0	0	1270	1570	1944	1420

双台风的相互作用存在着两个临界距离: d_m 和 d_c 。 $d > d_m$ 无合并, $d < d_m$ 有合并; $d > d_c$ 无互旋, $d < d_c$ 有互旋。这里, d 为两个台风中心之间的距离。

关于 d_m , Ritchie 和 Holland^[7] 用等值线动力学的途径, 初始场上 $d = 200$ km, 240 km, 260 km, 270 km, 280 km, 290 km, 300 km, 310 km, 320 km 时, 两个台风合并, $d = 340$ km, 350 km, 400 km 时, 两个台风分离。这样 d_m 的取值约为 330 km。在准地转正压模式的积分过程中, d 达到 300 km 时, 两个涡旋的合并的现象也出现了^[8]。文中浅水模式的结果(表1)表明: $d = 267$ km, 312 km 时, 两个台风分并。 $d = 356$ km, 400 km, 600 km, 800 km 时, 两个台风分离。这里的结果与文献[7]和[8]一致, 也能显示出双台风合并的临界点现象。

关于 d_c , 文献[2]中, d_c 的取值约为 6.5 个纬距, 即 720 km 左右。田永祥、寿绍文^[9] 在数值试验中, 也得到类似结果。本文试验 A₃, A₄, A₅ 中, 满足 $d < d_c$ 的条件, 两个台风都围绕其质量中心逆时针互旋。试验 A₆ 中, $d > d_c$, 两个台风没有任何互旋的运动形态(图略)。

除了临界距离 d_m 和 d_c 以外, 双台风相互作用另有 1 个参数: 互旋旋转角 α 。 α 一般随距离 d 的加大而减小。Chang^[10] 用无辐散准地转正压模式积分, $d = 400$ km, 600 km 时, 24 h 的旋转角分别为 58 和 20°; 本文结果: $d = 400$ km, 600 km (试验 A₄, A₅) 时, $\alpha = 56$ 和 15°。尽管所用模式不同, 结果比较一致。

此外, Evance 和 Holland^[6] 研究了南半球副热带高压脊与 1 个台风的相互作用。台风位于副热带高压脊和赤道之间。文献[6]中, 积分 3 个模式日, 台风向西南方向向极移动; 平均移速约为 315 km/d。本文做了类似的一个试验。试验中, 1 个台风位于北半球副热带高压脊和赤道之间。积分 5 个模式日。结果台风向西北方向移动, 平均移速约为 310 km/d。两者比较接近。

上述对比说明: 本文模式能够反映出同类数值研究的主要结果。因此, 可以用这个模式进一步分析副热带高压脊南侧双台风相互作用的问题。

3.2 副热带高压脊南侧东台风的移动特征

试验 B₁ 中, 副热带高压脊南侧只有 1 个台风。初始台风中心位置 $(I_0, J_0) = (142, 76)$, I_0, J_0 为格点号(图 1a)。试验 B₂ 中, 初始时刻有两个台风。西台风和东台风的中心位置分别为 $(142, 76)$ 和 $(126, 76)$ (图 1b)。其中东台风的位置与试验 B₁ 中台风初始位置相同。试验 B₁, B₂ 之间的惟一差别是, 前者无双台风作用, 后者有双台风作用。

3.2.1 双台风作用使东台风位置偏北

无双台风作用(试验 B₁) 时, 初始台风中心位于 15°N。从初始时刻到 36 h 内, 台风自东向偏西方向移动。36 小时时, 台风中心位于 15.7°N, 南北方向的位置变化不到 1 个纬距(图 1a, 1c)。

有双台风作用(试验 B_2)时, 初始东台风中心也位于 15°N , 在西台风的正东方向(图 1b)。由于双台风的互旋作用, 36小时时, 东台风已旋转至西台风的西北方向(图 1d)。这种互旋使东台风在36 h 内北移7个纬度, 从 15°N 到达 22°N 。与试验 B_1 相比, 36 h 东台风约偏北6个纬度。此后, 东台风的位置一直相对偏北(图 1e ~ h)。

3.2.2 双台风作用使东台风明显加速

Carr 和 Elsberry 概念模式的要点在于引进了台风能量频散过程。台风涡旋中 Rossby 波模态的能量频散, 线性条件下会生成沿正西- 正东方向的波列, 非线性条件下会生成沿西北- 东南方向的波列^[11, 12]。当台风位置相对偏南时, 位于台风东南方向的频散生成高值系统的位置也偏南。这个高值系统与副热带高压闭合中心的距离较远, 两者独自存在, 不能连为一体(试验 B_1 , 图 1c)

如上所述, 双台风互旋使东台风位置偏北。东台风频散生成高值系统的位置也相应地偏北, 与副热带高压闭合中心的距离较近。这种态势的直接后果是: 在36小时时, 副热带高

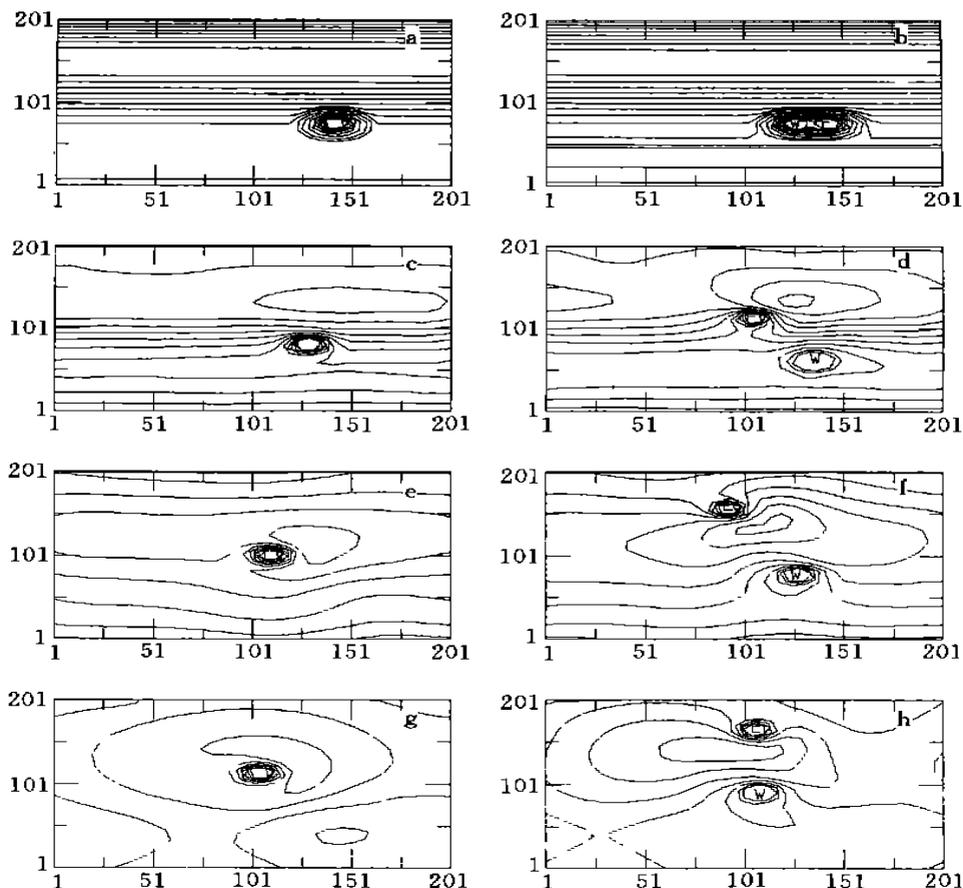


图1 试验 B_1 , B_2 中高度场的分布

(a. 试验 B_1 , 0 小时, b. 试验 B_2 , 0 小时, c. 试验 B_1 , 36 小时, d. 试验 B_2 , 36 小时, e. 试验 B_1 ,

84 小时, f. 试验 B_2 , 84 小时, g. 试验 B_1 , 108 小时, h. 试验 B_2 , 108 小时,

等值线间隔 10 m; 字母 E 和 W 分别代表东台风和西台风)

压与频散生成高值系统合并,副热带高压闭合单体向西南方向伸展出一个高压脊(试验 B₂,图1d)。这个伸展出来的高压脊,在文献[5]的概念模式中,处于核心环节的地位。文献[5]是天气学分析的结果,这里是清晰的数值依据。

由于这个伸展出来的高压脊,东台风和副热带高压闭合单体之间的等值线更加密集(图1d)。这里,用文献[13]的方法计算了试验 B₁和 B₂各时次的引导气流的速度和方位角。36小时,东台风引导气流的速度加快,为7.8 m/s,属中速移动的台风;无双台风作用时相应的引导气流的速度为4.8 m/s,属慢速移动的台风。此后,84 h,108 h 试验 B₂东台风引导气流的速度仍然较大(表2)。

表2 试验 B₁, B₂中引导气流的速度(m/s)和移向 θ (度)

试验	试验 B ₁			试验 B ₂ (东台风)		
	36 小时 (图1c)	84 小时 (图1e)	108 小时 (图1g)	36 小时 (图1d)	84 小时 (图1f)	108 小时 (图1h)
u_m	-4.6	-1.2	1.1	-6.9	2.8	2.6
v_m	1.4	1.8	1.6	3.6	2.8	-1.0
V	4.8	2.2	2.0	7.8	4.0	2.8
θ	287	326	326	298	45	111

3.2.3 东台风北折转向路径的形成

在试验 B₁的积分过程中,台风大体上向西北方向移动(图1e, g, 表2)。但是,试验 B₂中,东台风的移向是有变化的。双台风互旋以后,先向偏西北方向,后来转为偏北,最后转为偏东。这是一种北折转向路径。这种台风移向变化与引导气流移向变化是一致的。在36 h,84 h 和108 h,引导气流的移向分别为298°,45°和111°(图1f, h 表2)。

台风穿过副热带高压脊北折转向的现象,在实际大气中有时可以发生。杨美川、朱永禔^[14]对此做过数值研究。

概括而言,副热带高压脊南侧东风气流中的双台风作用,使东台风及其频散生成高值系统的纬度位置均明显偏北,有利于副热带高压闭合单体与东台风频散生成高值系统的合并,也有利于副热带高压脊向西南伸展,导致东台风引导气流速度加大,最终形成东台风北折转向的异常路径。在不存在双台风作用的情况下,副热带高压南侧的台风一直向偏西北方向移动。两者的差别是明显的。

3.3 副热带高压脊南侧西台风的移动特征

试验 B₂中,副热带高压脊南侧初始时刻有两个台风。试验 B₃中,副热带高压脊南侧只有一个台风,初始台风中心位置(I_0, J_0)=(126, 76),与试验 B₂中西台风的位置相同。试验 B₂, B₃之间的唯一差别是,前者有双台风作用,后者无双台风作用。

3.3.1 双台风作用使西台风移向异常

无双台风作用时,单个台风的移动路径仍属向偏西北方向移动的正常路径(试验 B₃,图2a)。有双台风作用时,西台风在第1~2个模式日阶段向东南方向移动,以后转为向偏西北方向移动(试验 B₂,图2b);属异常路径。

3.3.2 双台风作用使西台风移速多变

无双台风作用时,单个台风第1,2,3,4,5个模式日逐日移速为:270 km/d,180 km/d,400 km/d,400 km/d,310 km/d。5 d 平均移速为312 km/d。最慢、最快移速分别是平均移

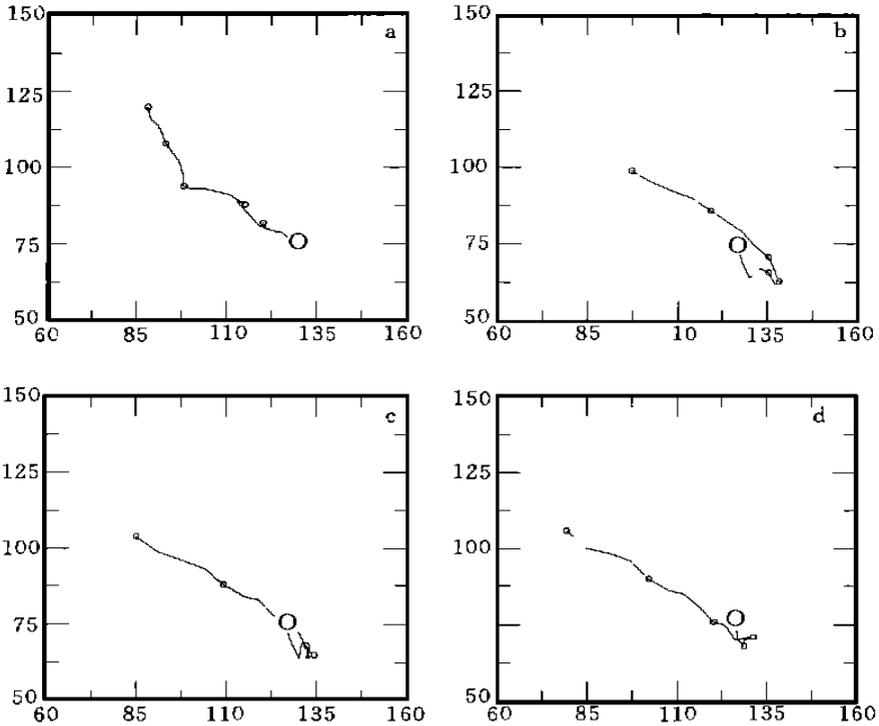


图2 试验 B₃及试验 B₂, C₁, C₂中西台风路径

(a. 试验 B₃, b. 试验 B₂, c. 试验 C₁, d. 试验 C₂; 图框数字为计算区域格点号, 图框代表 2226 km × 2226 km; 字母 O 代表西台风初始位置, 路径上每隔 24 h 标注一次位置)

速的 0.58 倍和 1.28 倍。移速均方差为 37.2 km/d。有双台风作用时, 西台风逐日移速为: 350 km/d, 100 km/d, 200 km/d, 530 km/d, 580 km/d。5 d 平均移速为 352 km/d。最慢、最快移速分别是平均移速的 0.28 倍和 1.65 倍。移速均方差为 82.5 km/d。可见: 双台风作用使西台风移速时快时慢的现象相当明显。

现讨论试验 B₂中西台风移速多变的可能原因。第 1 个模式日期间, 由于两个台风之间距离较近, 互旋作用使西台风向东南方向的移速较快。第 2 个模式日期间, 两个台风之间的距离加大, 相互作用减弱, 西台风继续向东南方向移动的速度减慢。从第 3 个模式日起, 双台风直接作用不再明显。此时, 在环境流和 β 效应的共同作用下, 西台风向偏西北方向移动。移动过程中, 西台风北侧等高线逐渐变密(图略), 移速又转为加快。

3.4 副热带高压脊不同初始强度的影响

为了在更多参数取值的条件下分别分析副热带高压脊南侧双台风的作用, 实施了试验 C₁, 试验 C₂。与试验 B₂相比, 试验 C₁和 C₂中副热带高压脊的初始强度分别增强 1.5 和 2.0 倍, 即在式(5)中, 分别令 h₀ 为 75 m 和 100 m。其余参数与试验 B₂相同。

如上所述, 从副热带高压闭合中心向西南方向伸展出来的高压脊, 在 Carr 和 Elsberry 的概念模式中处于核心的环节。在试验 C₁和 C₂中, 这个高压脊仍然能够激发出来, 但伸展的距离不如试验 B₂那样远; 此外, 副热带高压闭合中心的强度也比试验 B₂要稍弱些, 试验 C₂中的副热带高压更接近带状分布(图 3a, b, 1d)。

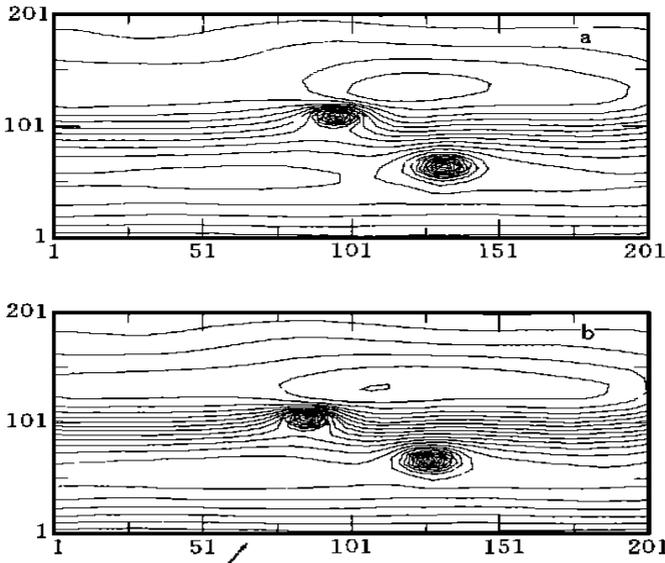


图3 试验 C_1 和 C_2 中第36小时高度场的分布
(a. 试验 c_1 , b. 试验 c_2 ; 等值线间隔为 10 m)

试验 B_2 中西台风第1个模式日移速加快, 第2~3个模式日移速减慢, 第4~5个模式日移速再次加快的移速变化特征, 以及先向东南方向再转向西北方向移动的移向变化特征, 在试验 C_1 中仍然比较明显(图2c)。另一方面, 在试验 C_2 中, 第1个模式日西台风移速加快的特征不再保持, 其它特征继续存在(图2d)。看来副热带高压脊本身的强度对西台风异常路径的形成也有一定的作用。

4 结果和讨论

天气学的概念模式是在分析大量观测个例的基础上提炼出来的, 其中又往往含有理论研究新进展的成份。如 Carr 和 Elsberry^[5] 以及 Lander 和 Holland^[4] 分别将不同尺度涡旋之间非线性作用和非线性动力学的分支点引进了各自的概念模式。因而, 针对不断完善的概念模式, 实施数值模式的试验研究, 是一条将观测、理论和数值研究结合起来的途径。这一途径与单纯的数值试验相比, 似乎更为可取。

本文对美国科学家20世纪90年代后期提出的台风相互作用的概念模式, 用正压原始方程模式实施数值研究, 结果证实了该概念模式的合理性。

同时, 由于模式大气中可以输出更多的中间结果, 可以对该概念模式涉及到但未仔细分析的问题, 进行更为细致的分析。如该概念模型对台风移向突变和移速突变的涉及甚少, 文中对此做了较详细的讨论。认为: 副热带高压脊南侧双台风的相互作用, 是激发台风移向突变和移速突变的一个原因, 从而加深了对此类异常路径形成机制的科学理解。

双台风作用是台风动力学的一个重要问题。无环境气流的条件下, 双台风作用的主要特征可以用藤原模型来概括(见文献[5])。由于实际大气双台风的作用是在环境场中发生的, 所以, 观测到的双台风路径与藤原模型有一定出入^[4]。进一步分析环境场和双台风的共同作用十分重要。在定常水平切变东风环境气流的条件下, 双台风作用的特征, 包括逆

时针互旋的速率以及合并和分离临界距离的取值等, 均会发生变化^[2]。在非正常环境气流的条件下, 高栓柱、徐祥德和陈联寿^[15]分析了一个副热带高压闭合单体和两个台风的相互作用, 提出了双台风间接作用的数值结果。本文分析了副热带高压脊南侧东风气流环境场中双台风作用的特征, 要点是台风能量频散引起副热带高压脊向西南方向伸展, 从而导致台风路径的异常, 这是一个新的数值结果。

实际大气中副脊南侧双台风作用问题极其复杂, 本文仅仅是初步结果, 不够全面。今后将对此继续进行研究。

参考文献

- 1 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979, 298 ~ 305
- 2 Dong K, Neumann C J. On the relative motion of the binary tropical cyclones. *Mon wea Rev*, 1983, 111: 945 ~ 953
- 3 王玉清, 朱永禔. 双热带气旋相互作用的机制分析及数值研究(一). *大气科学*, 1992, 16(6): 573 ~ 582
- 4 Lander M, Holland G J. On the interaction of tropical cyclone-scale vortices. 1: observations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 119: 1347 ~ 1361
- 5 Carr L E, Elsberry R L. Objective diagnosis of binary tropical cyclone interactions for the western north Pacific basin. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 1734 ~ 1749
- 6 Evans J L, Holland G J, Elsberry R L. Interactions between a barotropic vortex and an idealized subtropical ridge, part I: Vortex motion. *J Atmos Sci*, 1991, 48: 301 ~ 314
- 7 Ritchie E A, Holland G J. On the interaction of tropical cyclone-scale vortices, 2: discrete vortex patches. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 119: 1363 ~ 1379
- 8 罗哲贤. 涡度规则分布与非规则分布的转换. *气象学报*, 1998, 56(6): 654 ~ 663
- 9 田永祥, 寿绍文. 双TC相互作用的研究. *气象学报*, 1998, 56(5): 584 ~ 593
- 10 Chang S W J. A numerical study of the interactions between two tropical cyclones. *Mon Wea Rev*, 1983, 11: 1806 ~ 1817
- 11 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
- 12 徐祥德, 陈联寿, 解以扬. TCM-90现场试验台风能量频散波列特征. *气象学报*, 1998, 56(2): 129 ~ 138
- 13 王志烈, 费亮. 台风预报手册. 北京: 气象出版社, 1987, 143 ~ 145
- 14 杨美川, 朱永禔. TC穿越副热带高压的数值试验. *热带气象学报*, 1998, 14: 85 ~ 90
- 15 高栓柱, 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: 85-906-07课题组. 台风科学. 业务试验和天气动力学理论的研究. 第二分册. 北京: 气象出版社, 1996, 179 ~ 184

BINARY TROPICAL CYCLONE INTERACTIONS ON THE SOUTH OF AN IDEALIZED SUBTROPICAL RIDGE

Luo Zhexian Ma Jingxian

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Abstract

A shallow-water equation model is integrated on a beta-plane centered at 20°N to study the conceptual model concerning binary tropical cyclone interactions numerically, which is proposed by Carr and Elsberry in 1998. Results show that their model has certain validity and that the interactions in the easterly current can create unusual tracks such as the abrupt changes of direction and / or velocity.

Key words: Subtropical ridge, Binary tropical cyclones, Interactions, Conceptual model, Numerical experiments.