

非轴对称双涡相互作用的研究^{*}

沈 武^{1,2} 周嘉陵^{1,3} 马镜嫻¹ 陈联寿⁴ 罗哲贤¹

1 南京信息工程大学, 南京, 210044

2 浙江省气象科学研究所, 杭州, 310017

3 江苏省气象台, 南京, 210008

4 中国气象科学研究院, 北京, 100081

摘 要

在平流动力学的框架内, 用准地转正压涡度方程模式实施了 19 组试验, 研究双涡合并的条件及较大尺度涡旋自组织的问题。结果指出: (1) 存在着两个影响双涡合并的因素, 即初始双涡中心之间的距离和初始涡旋的非轴对称分布。初始两个对称涡旋合并具有明显的临界距离效应, 但初始两个非轴对称涡旋能否合并还受到初始涡旋的非对称结构的复杂影响。(2) 存在着两类不同的较大尺度涡旋的自组织过程, 形成较大尺度涡旋。第一类, 初始两个涡旋相同, 均呈轴对称分布。双涡作用经历了缓变、快变, 以及涡量羽翼的生成、拉伸和发展的过程, 合并后呈对称性流型; 终态涡内区涡量的堆积来源于两个初始涡, 终态涡外区的螺旋带来源于两个初始涡外缘线涡量羽翼的拉伸。第二类, 初始两个涡旋不同, 一个为椭圆型, 一个为偏心型, 均呈非轴对称分布。双涡作用中, 椭圆涡一边互旋, 一边向计算区域中心靠近, 同时涡量范围加大, 形成了终态涡的内核区; 偏心涡一边互旋, 一边被不断拉伸, 形成了终态涡的螺旋带区; 表现出终态涡内区的涡量堆积来源于椭圆涡, 终态涡外区螺旋带主要来源于偏心涡的反复拉伸及断裂的特性。

关键词: 涡旋, 合并, 自组织。

1 引 言

涡旋自组织是 2003 年国际涡旋动力学会议的第一优先课题, 目前正受到广泛关注。所谓涡旋自组织, 指的是初始时刻两个或多个尺度较小的涡旋, 经过一段时间演变, 形成了一个尺度较大的涡旋。在此过程中, 没有明显的非绝热加热强迫作用。同时, 较小涡旋距离水平侧边界很远, 边界强迫的作用也可忽略。因此, 这个尺度较大的涡旋不是强迫生成的, 而是自发生成的, 自发生成的主要机制是非线性的相互作用。

双涡合并是涡旋自组织的一种重要方式。双涡合并的研究已取得一系列的结果, 包括等值线动力学方法^[1]、理论分析^[2-3]、数值研究^[4-7]、模型试验^[3,8]和诊断分析^[9-12]等。

在双涡合并动力学的研究^[1-7]中, 初始涡旋分

别为常值涡和兰金涡、Myers 涡、对数廓线涡等。这些涡的相对涡度廓线均与方位角无关, 系轴对称分布。据代刊等的分析, 实际大气中的涡廓线大多呈非轴对称分布。非轴对称分布对双涡合并有什么影响, 这是本文拟研究的一个问题。

其次, 尽管涡合并是涡自组织的重要方式, 但是, 两者研究的侧重点是有区别的。涡合并研究主要关注的是涡合并的条件, 特别是初始临界距离的判别; 涡自组织研究主要关注的是一个较大尺度的涡是如何一步一步地组织起来的, 以及组织起来的涡的性质等。我们偏重于从涡自组织的角度来分析双涡相互作用。本文拟研究的数个问题为初始较小尺度非轴对称涡的自组织过程及其终态特征。

1998 年长江流域特大洪涝时, 存在涡自组织现象^[13]; 造成灾害的 Oliver 台风也是由两个 β 中尺度涡自组织生成的^[14]。

^{*} 初稿时间: 2005 年 7 月 7 日; 修改稿时间: 2005 年 8 月 15 日。

资助课题: 国家自然科学基金重点项目 (40333028) 和甘肃省十五重点项目 (CGS012-A45-118)

作者简介: 沈武, 温州人, 1967 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事大气动力学研究。

代刊, 罗哲贤, 地球大气中涡分布的诊断研究, 2004

2 模式和试验概述

f 平面二维无辐散准地转流遵从以下约束:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \Psi + J(\Psi, \nabla^2 \Psi) - \nu \nabla^4 \Psi = 0 \quad (1)$$

式中 Ψ 为地转流函数, J 为雅可比算符, ν 为耗散系数。式(1)中第 2 项与第 3 项之比为雷诺数。雷诺数表征了非线性程度的强弱。令 $\nu = 0$ 时, 式(1)是一个高度非线性的系统。高度非线性是涡自组织的一个重要的根源。

用特征水平尺度 L 和特征水平风速 V 将式(1)无量纲化。令 $L = 500 \text{ km}$, $V = 10 \text{ m/s}$ 。关于初始条件, 令

$$\xi(x, y, 0) = \xi_1(x, y, 0) + \xi_2(x, y, 0) \quad (2)$$

式中 $\xi = \nabla^2 \Psi$, 为相对涡度(或称涡量)。

$\xi_1(x, y, 0)$ 位于计算区域中心点 O 以西。在不同的试验中, ξ_1 分别描述准圆形涡, 准椭圆涡和偏心涡。准圆形和准椭圆涡定义为

$$\xi_1(x, y, 0) = \begin{cases} \xi_0 \sin\left(\frac{x - x_1}{x_3 - x_1} \pi\right) \sin\left(\frac{y - y_1}{y_3 - y_1} \pi\right) \\ (x_2 \geq x \geq x_1, y_3 \geq y \geq y_1) \\ 0 \quad \text{其余区域} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $x_3 - x_1 = y_3 - y_1$ 时为准圆形涡, $x_3 - x_1 \neq y_3 - y_1$ 时为准椭圆涡。

偏心涡定义为

$$\xi_1(x, y, 0) = \begin{cases} \xi_0 \sin\left(\frac{x - x_1}{x_2} \pi\right) \sin\left(\frac{y - y_1}{y_3 - y_1} \pi\right) \\ (x_2 \geq x \geq x_1, y_3 \geq y \geq y_1) \\ \xi_0 \sin\left(\frac{x - x_2}{x_3 - x_2} \pi\right) \sin\left(\frac{y - y_1}{y_3 - y_1} \pi\right) \\ (x_3 \geq x \geq x_2, y_3 \geq y \geq y_1) \\ 0 \quad \text{其余区域} \end{cases} \quad (4)$$

$\xi_2(x, y, 0)$ 位于计算区域中心点 O 以东。在不同的试验中, ξ_2 分别描述准圆形涡和准椭圆涡

$$\xi_2(x, y, 0) = \begin{cases} \xi_0 \sin\left(\frac{x - x_4}{x_6 - x_4} \pi\right) \sin\left(\frac{y - y_1}{y_3 - y_1} \pi\right) \\ (x_6 \geq x \geq x_4, y_3 \geq y \geq y_1) \\ 0 \quad \text{其余区域} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $x_6 - x_4 = y_3 - y_1$ 时为准圆形涡, $x_6 - x_4 \neq y_3 - y_1$ 时为准椭圆涡。

式(3) — (5) 中参数 $x_i (i = 1, 2, 3, 4, 6)$ 和 $y_j (j = 1, 3)$ 的取值决定了初始涡旋的空间尺度, 参数 ξ_0 决定了初始涡旋的强度。本文中, 初始涡旋在 β 中尺度范围。由于 f 平面假定, 初始涡旋没有 β 飘移, 始终远离计算区域边界, 故可取较简单的边条件。在南北边界, 令 $\frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0$; 在东西边界, 取循环边条件。

计算区域为 $2000 \text{ km} \times 2000 \text{ km}$ 的正方形, $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ km}$, 计 401×401 个格点。在计算区域中心点 O , $(x, y) = (0, 0)$ 。时间步长 $\Delta t = 1.5 \text{ min}$ 。

计实施 A, B, C 3 组试验, 均积分 8 个模式日。均令 $\xi_0 = 10.0$ (无量纲量)。

A 组试验是准圆形轴对称分布的双涡试验。这组试验有两个目的。一是与以往工作的结果进行对比, 说明本模式的可用性; 二是作为基底试验, 非轴对称分布双涡作用的试验结果可以与之比较。

A 组计有 8 个试验, 记为试验 $A_i (i = 1, 2 \dots 8)$ 。试验参数见表 1。

初始时刻双涡中心的坐标分别为 $(x_2, 0.0)$ 和 $(x_5, 0.0)$ 。双涡中心之间的距离 L_0 从 440 km 依次减小至 300 km (表 1)。

初始涡旋的非轴对称分布包括两类, 即椭圆型和偏心型。

B 组试验是椭圆型双涡的试验, 计有 4 个, 记为

表 1 A 组试验参数 (除 L_0 外均为无量纲量)

Table 1 Parameters (non-dimensional quantities except L_0) for Exp A

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_1	y_2	$L_0(\text{km})$
试验 A_1	-0.69	-0.44	-0.19	0.19	0.44	0.69	-0.25	0.25	440
试验 A_2	-0.67	-0.42	-0.17	0.17	0.42	0.67	-0.25	0.25	420
试验 A_3	-0.65	-0.40	-0.15	0.15	0.40	0.65	-0.25	0.25	400
试验 A_4	-0.63	-0.38	-0.13	0.13	0.38	0.63	-0.25	0.25	380
试验 A_5	-0.61	-0.36	-0.11	0.11	0.36	0.61	-0.25	0.25	360
试验 A_6	-0.59	-0.34	-0.09	0.09	0.34	0.59	-0.25	0.25	340
试验 A_7	-0.57	-0.32	-0.07	0.07	0.32	0.57	-0.25	0.25	320
试验 A_8	-0.55	-0.30	-0.05	0.05	0.30	0.55	-0.25	0.25	300

试验 $B_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。

C 组试验是椭圆涡与偏心涡相互作用的试验，

计有 7 个,记为试验 $C_i (i = 1, 2 \dots 7)$ 。这两组试验的参数列于表 2。

表 2 B 和 C 组试验参数(除 L_0 外均为无量纲量)

Table 2 Parameters (non-dimensional quantities except L_0) for Exp B and Exp C

	x_d	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_1	y_2	$L_0(\text{km})$
试验 B_1	—	- 0.63	- 0.38	- 0.13	0.13	0.38	0.63	- 0.15	0.15	380
试验 B_2	—	- 0.63	- 0.38	- 0.13	0.13	0.38	0.63	- 0.20	0.20	380
试验 B_3	—	- 0.63	- 0.38	- 0.13	0.13	0.38	0.63	- 0.30	0.30	380
试验 B_4	—	- 0.63	- 0.38	- 0.13	0.13	0.38	0.63	- 0.35	0.35	380
试验 C_1	0.1	- 0.61	- 0.46	- 0.21	0.21	0.46	0.71	- 0.30	0.30	460
试验 C_2	0.1	- 0.59	- 0.44	- 0.19	0.19	0.44	0.69	- 0.30	0.30	440
试验 C_3	0.1	- 0.57	- 0.42	- 0.17	0.17	0.42	0.67	- 0.30	0.30	420
试验 C_4	0.1	- 0.53	- 0.40	- 0.15	0.15	0.40	0.65	- 0.30	0.30	400
试验 C_5	0.1	- 0.53	- 0.38	- 0.13	0.13	0.38	0.63	- 0.30	0.30	380
试验 C_6	0.1	- 0.51	- 0.36	- 0.11	0.11	0.36	0.61	- 0.30	0.30	360
试验 C_7	0.1	- 0.49	- 0.34	- 0.09	0.09	0.34	0.59	- 0.30	0.30	340

3 影响双涡合并的两类条件

在试验 A 的初始场上,两个涡旋的分布和强度

相同,均呈准轴对称分布。记两个涡旋中心之间的距离为 L 。 L 随时间的变化可以清楚地显示双涡是否合并(图 1)。

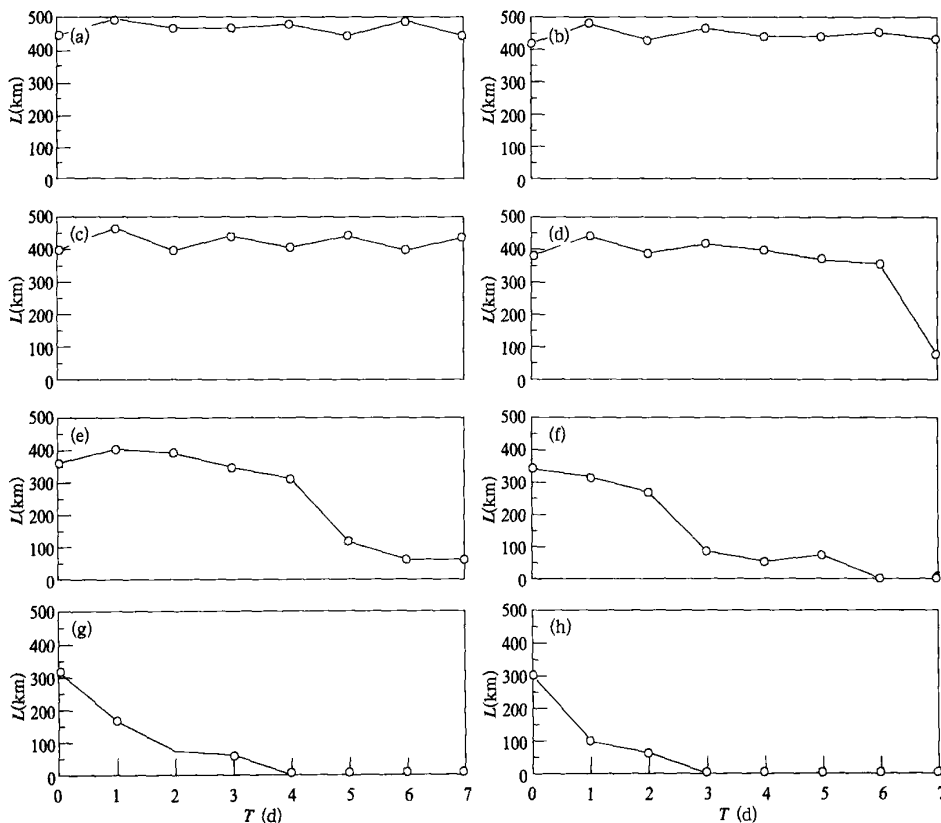


图 1 试验 $A_1 - A_8$ (a - h) 中,双涡中心之间距离 L 随时间的变化(L_0 取值同表 3)

Fig. 1 Temporal evolution of the distance (L ; L_0 as Table 3) between the centers of binary-vortex in experiments $A_1 - A_8$ (a - h)

显然,初始距离 $L_0 \geq 400$ km 时,在 7 个模式日期间,双涡并不合并(图 1a—1c); $L_0 < 400$ km 时,双涡均合并;同时, L_0 愈小,合并的时间愈提前(图 1d—1h)。因此,合并临界距离 L_c 约为 400 km。

在涡合并动力学的工作中,一般不是用初始距

离 L_0 的绝对值,而是用初始距离 L_0 的相对值,即比值 τ 来讨论。这里, $\tau = L_0 / R_0$, R_0 为初始涡旋的半径。试验 A 中, $R_0 = 125$ km。A 组 8 个试验的比值 τ 列于表 3。

表 3 试验 A₁—A₈ 中 τ 的取值(无量纲)

Table 3 τ values (non-dimensional quantity) in Exps A₁ - A₈

试验	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
L_0 (km)	440	420	400	380	360	340	320	300
τ	3.52	3.36	3.20	3.04	2.88	2.72	2.56	2.40

可见与临界距离 L_c 相应的临界值 τ_c 约为 3.20。这个结果与 Holland 和 Dietachmayer^[1]一致。

如上所述,以往的同类研究一般限于初始轴对称涡旋的框架;这时,影响双涡合并的重要的或惟一的条件,是初始距离 L_0 是否小于临界值 L_c 。本文 A 组试验也得到了与文献[1]一致的结果。

B 组试验初始涡旋为椭圆状。试验 B₁ 和 B₂ 中,长轴沿东西方向,呈横椭圆形;试验 B₃ 和 B₄ 中,长轴沿南北方向,呈竖椭圆形(表 2)。尽管 4 个试验双涡中心之间的初始距离 L_0 均小于 L_c ,理应合并,但是,仍有不合并(试验 B₁ 和 B₂,图 2a - 2b)与合并(试验 B₃,图 2d);试验 B₄(图略)的区别。为了比较,图 2 中还列入了试验 A₄ 的结果。

C 组试验的初始场上,一个涡旋为竖椭圆形的非轴对称结构,另一个涡旋为偏心圆形的非轴对称结构(图 6a)。这是比双椭圆非轴对称结构(试验 B)更复杂的一种初始分布。

C 组试验与 A 组试验的对比表明,非轴对称结构引入后有两点差别:(1) $L_0 = 400$ km,准轴对称结构时,双涡不合并(图 1c);但非轴对称结构时,双涡合并了(图 3c)。(2) 合并时间明显提前。 L_0 为 380,360,340 km(图 3e,3f,3g)时,非轴对称结构条件下,合并时间分别提前 3,4 和 1 d。这意味着,在 C 组非轴对称结构的情况下,双涡更容易合并。

综上所述,我们初步认为,除了初始双涡中心之间的距离这个条件外,初始涡旋的非对称结构对能否合并也有一定的影响能力,这是影响双涡合并的另一个条件。

4 涡旋自组织的两类过程

在 A,B,C 组试验中,均存在双涡合并的现象。

与初始涡旋相比,合并后涡旋的尺度较大。现在,我们分析尺度较大涡旋的自组织过程,以及初始涡旋非轴对称结构对自组织过程及其终态特征的影响。

4.1 准轴对称初始涡旋的自组织及其终态特征

在试验 A₄ 的初始场上,有一对相距 380 km 的准轴对称涡旋(图 2e)。 $t = 168$ h,这两个初始准轴对称涡已经合并(图 2f)。图 4 给出了试验 A₄ 相对涡度场随时间的演变。

图 4 结果可以归纳为:

(1) 双涡作用的缓变过程和快变过程

在 0—120 h,双涡作用的主要特征是互旋,双涡中心之间的距离 L 随时间变化不大(图 4a - 4f),这是一个缓变的过程。144—168 h,两个涡中心迅速靠近,涡合并发生,这是一个快变的过程(图 4g - 4f)。这一点从图 1d 也可看到。

(2) 涡量羽翼的生成、拉伸和发展

缓变期与快变期的转换发生在 $t = 120$ h 附近。与 $t = 0$ h(图 4a)相比,除了涡量散布区域(阴影区)加大以外,主要的差别是阴影区外缘线涡量羽翼的形成(图 4f)。这个涡量羽翼的拉伸和发展,与两个涡中心的迅速靠近是同时发生的。

(3) 合并后流型的对称性

合并后的流型呈“S”型(图 4h)。两个拉伸的羽翼,涡中心的阴影区形状,以及两个涡中心,关于计算区域中心点 O ,都具有某种对称性。说明合并后的流型对初始涡的对称性是有记忆的。

试验 A₄ 中,合并后的流型(图 4h)并没有达到一个准定常的终态。与图 4h 类似流型随后的演变过程,可从试验 A₅ 的结果中见到(图 5)。

试验 A₅ 中,初始时刻双涡中心之间的距离 $L_0 = 360$ km(表 1)。双涡互旋,阴影区外缘线羽翼生成

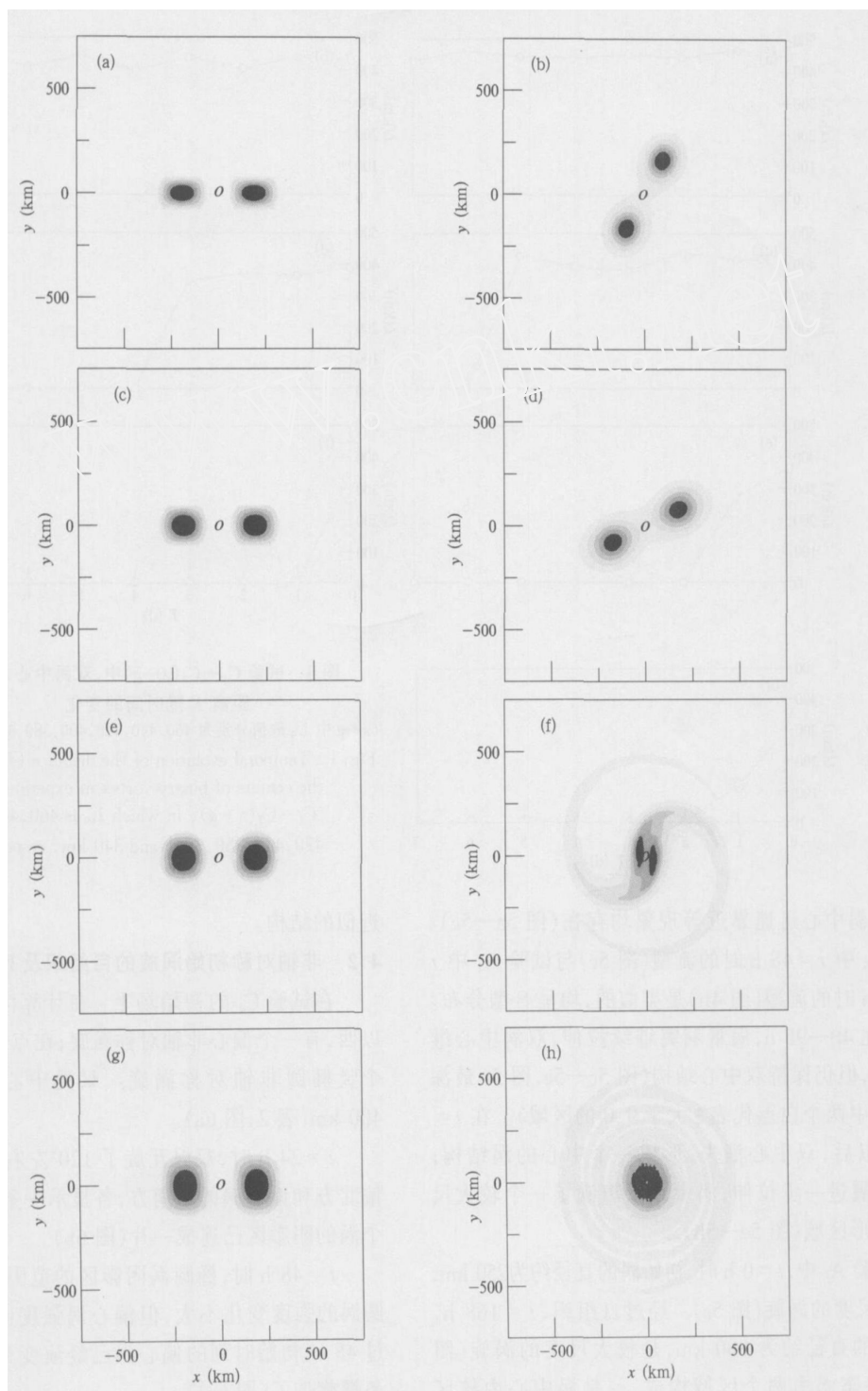


图 2 试验 B_1, B_2, A_4, B_3 中, 相对涡度的分布

(a, b. 试验 $B_1, t = 0 \text{ h}, t = 168 \text{ h}$; c, d. 试验 $B_2, t = 0 \text{ h}, t = 168 \text{ h}$; e, f. 试验 $A_4, t = 0 \text{ h}, t = 168 \text{ h}$; g, h. 试验 $B_3, t = 0 \text{ h}, t = 168 \text{ h}$ 。阴影区从浅到深, 相对涡度取值由小到大。

不同深浅阴影区交界线上, 相对涡度依次取值为 7.0, 5.0, 1.0, 0.1 (无量纲量))

Fig. 2 Relative vorticity distributions in experiments B_1, B_2, A_4, B_3 at $t = 0$, and $t = 168 \text{ h}$ (a, c, e, g; and b, d, f, h, respectively) The boundary lines between different grayscale levels denote successively the relative vorticity of 0.1, 1.0, 5.0 and 7.0 (non-dimensional quantity), respectively, with the darkest shading > 7.0

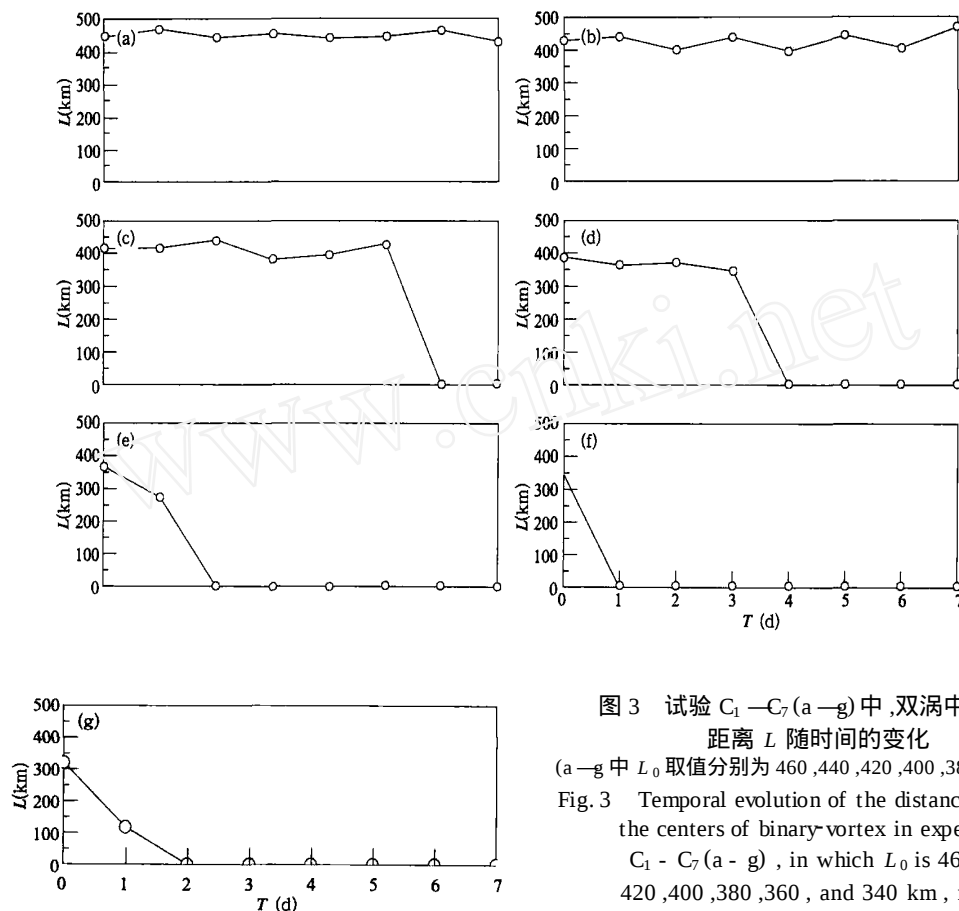


图3 试验 C_1-C_7 (a—g) 中, 双涡中心之间距离 L 随时间的变化

(a—g 中 L_0 取值分别为 460, 440, 420, 400, 380, 360, 340 km)

Fig. 3 Temporal evolution of the distance (L) between the centers of binary-vortex in experiments

$C_1 - C_7$ (a - g), in which L_0 is 460, 440, 420, 400, 380, 360, and 340 km, respectively

以及双涡中心迅速靠近等现象均存在(图 5a—5c)。试验 A_5 中 $t = 48$ h 时的流型(图 5c)与试验 A_4 中 $t = 168$ h 时的流型(图 4h)是类似的, 均呈 S 型分布。此后, 在 48—96 h, 涡量羽翼继续拉伸, 双涡中心继续靠近, 但仍保持双中心结构(图 5c—5e, 图 5e 最深阴影区中两个白点代表 ξ 大于 9.0 的区域)。在 $t = 120$ h 以后, 双中心消失, 形成一个中心的涡结构; 涡量羽翼进一步拉伸, 涡量几乎填满了一个较大尺度的圆形区域(图 5e—5h)。

试验 A_5 中, $t = 0$ h 时, 初始涡的直径约为 250 km, 是较小尺度的涡旋(图 5a)。经过自组织, $t = 168$ h, 终态涡的直径约为 880 km, 是较大尺度的涡旋(图 5h)。终态涡由两个区域构成, 一是涡中心内核区(图 5h 深色阴影区); 二是内核区以外的螺旋带区。

由上述讨论可知, 内核区是两个初始涡的涡中心部分合并形成的; 螺旋带区是两个初始涡的涡量羽翼不断拉伸形成的(图 5b—5h)。因此, 两个初始涡对终态涡的形成, 起着同样重要的作用。此外, 我们还注意到, 图 5h 的终态涡显示了一种与台风涡旋

近似的结构。

4.2 非轴对称初始涡旋的自组织及其终态特征

在试验 C_4 的初始场上, 在计算区域中心点 O 以西, 有一个偏心非轴对称涡旋; 在点 O 以东, 有一个竖椭圆非轴对称涡旋。双涡中心初始距离为 400 km(表 2, 图 6a)。

$t = 24$ h 时, 双涡互旋了 120° 左右; 在椭圆涡的偏北方和偏心涡的偏南方, 各显示一条涡量羽翼; 两个涡的阴影区已连成一片(图 6b)。

$t = 48$ h 时, 椭圆涡阴影区的范围继续扩大, 椭圆涡的强度变化不大, 但偏心涡强度明显减弱。经过 48 h, 初始时刻的偏心涡已经演变为椭圆涡的一条螺旋带了(图 6c)。

$t = 72$ h 时, 在椭圆涡阴影区外缘, 出现了一个新的羽翼; 在椭圆涡的南面, 有一片散布的涡量区(图 6d)。

$t = 96$ h 时, 偏心涡已经不存在任何涡的痕迹, 偏心涡从涡演变为螺旋带的过程已经基本完成。同时, 图 6d 上的散布涡量区也被拉伸成螺旋状(图 6e)。

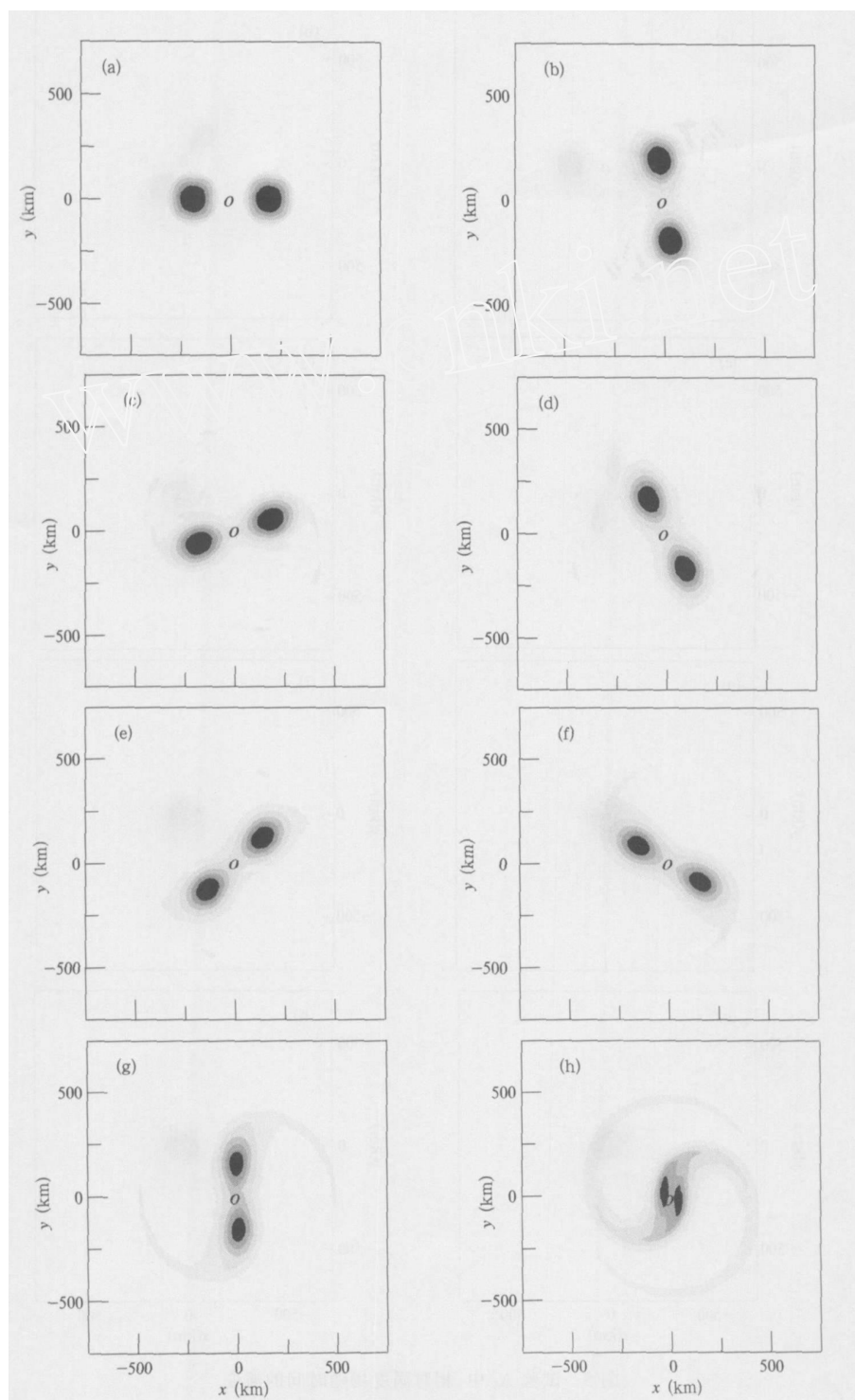


图 4 试验 A₄ 中相对涡度场随时间的演变

(a - h: t 分别为 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 h; 其余说明同图 2)

Fig. 4 Temporal evolution of the relative vorticity in Exp A₄

(a - h: $t = 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168$ h; others same as Fig. 2)

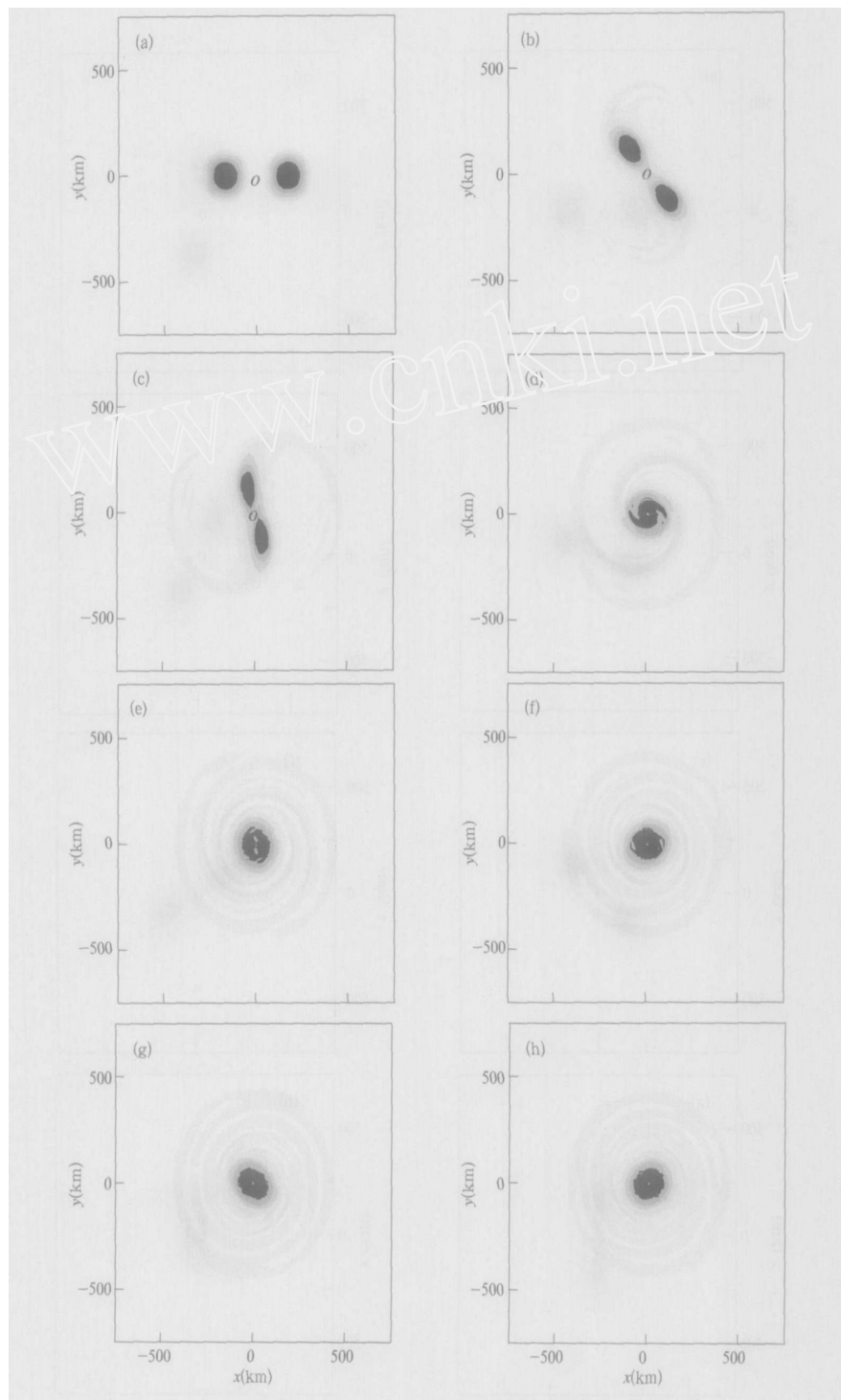


图 5 试验 A₅ 中,相对涡度场随时间的演变

(a - h. t 分别为 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 h; 其余说明同图 2)

Fig. 5 Same as Fig. 4 but for Exp A₅

0—96 h, 偏心涡内核区始终没有与椭圆涡内核区接触, 合并涡内核区的涡量看来与偏心涡无关。

96—168 h, 椭圆涡的螺旋带继续拉伸(图 6f),

然后断裂, 形成两条螺旋带。但是, 这两条螺旋带有主次长短之别, 因此, 终态流型不以计算区域中心点 O 为对称(图 6g - h)。

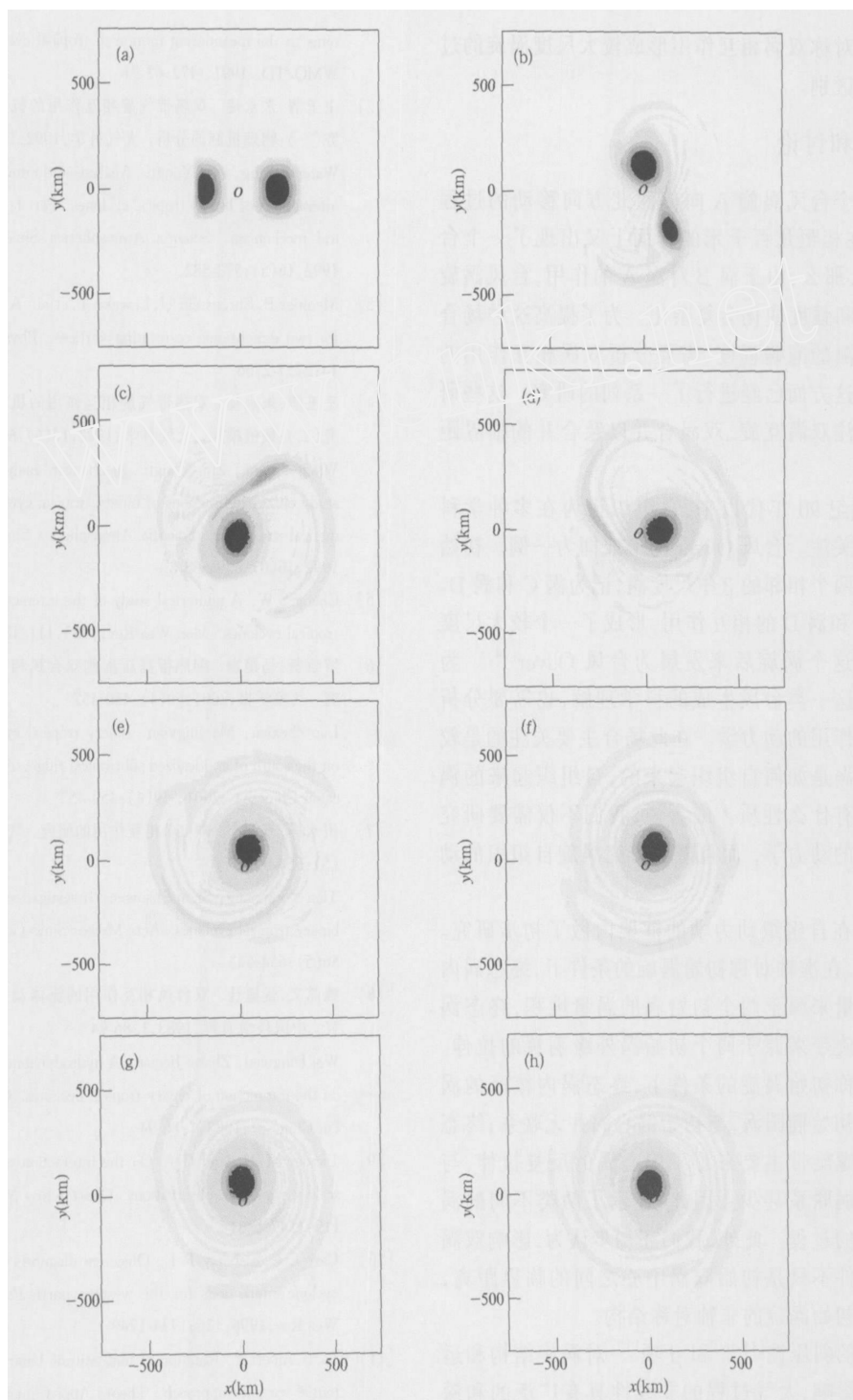


图 6 试验 C_4 中,相对涡度场随时间的演变

(a - h. t 分别为 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 h; 其余说明同图 2)

Fig. 6 Same as Fig. 4 but for Exp C_4

由上述讨论可知,在非轴对称初始涡的条件下,椭圆涡和偏心涡对终态流型的贡献是不同的。椭圆涡一边互旋,一边向计算区域中心靠近,同时涡量阴影区

的范围加大,形成了终态涡的内核区;偏心涡一边互旋,一边被不断拉伸,形成了终态涡的螺旋带区。这个自组织的过程与台风 Oliver 的形成比较相似,与

上述准轴对称双涡相互作用形成较大尺度涡旋的过程有显著区别。

5 结论和讨论

在一个台风涡旋 A 向偏西北方向移动的过程中,如果在相距几百千米的洋面上又出现了一个台风涡旋 B,那么,由于涡 B 对涡 A 的作用,台风涡旋 A 的路径和强度变化会复杂化。为了提高这种场合下台风预测的准确程度,需要分析双涡相互作用的动力学。这方面已经进行了一系列的研究。这些研究主要关注双涡互旋,双涡合并以及合并的临界距离等。

20 世纪 90 年代以来,自组织行为在多种学科领域受到关注。台风 Oliver 的形成即为一例。初始时刻存在两个相邻的 β 中尺度涡,记为涡 C 和涡 D。由于涡 C 和涡 D 的相互作用,形成了一个较大尺度的涡旋。这个涡旋后来发展为台风 Oliver^[14]。为了加深对这一类台风生成的科学理解,也需要分析双涡相互作用的动力学。在此场合主要关注的是较大尺度的涡是如何自组织起来的,自组织起来的涡结构又具有什么性质。或者说,我们不仅需要研究双涡合并的动力学,而且需要研究涡旋自组织的动力学。

本文在自组织动力学的框架内做了初步研究。结果表明,在准轴对称初始涡旋的条件下,终态涡内核区的涡量来源于两个初始涡的涡量堆积,终态涡外区的螺旋带来源于两个初始涡外缘羽翼的拉伸。在非轴对称初始涡旋的条件下,终态涡内核区的涡量来源于初始椭圆涡,与初始偏心涡并无联系;终态涡外区的螺旋带主要来源于偏心涡的反复拉伸,与初始椭圆涡联系甚少。因此,显示了两类不同的涡旋自组织的过程。此外,我们还初步认为,影响双涡合并的条件不只是初始双涡中心之间的临界距离,还应包括初始涡旋的非轴对称结构。

大气的斜压性^[15-16]和 β 项^[17]对涡旋结构和运动有重要影响,大气过程的非线性具有广泛的和深刻的含意^[18-19],本文结果是初步的,需要深刻研究。

致谢:朱永祺研究员,徐祥德研究员,纽学新研究员对本文第一、第二作者给予指导,谨致谢意。

参考文献

[1] Holland G J, Dietachmayer G S. Contributions by mesoscale sys-

tems to the meandering motion of tropical cyclones. I: theory. WMO/ TD. 1991, 472: 62-71

- [2] 王玉清, 朱永祺. 双热带气旋相互作用的机制分析及数值研究(一): 物理机制的分析. 大气科学, 1992, 16(5): 573-582
Wang Yuqing, Zhu Yongqi. Analysis and numerical study of the interactions of binary tropical cyclones. Part I: Analysis of physical mechanism. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1992, 16(5): 573-582
- [3] Meunier P, Ehrenstein U, Leweke T, et al. A merging criterion for two dimensional co-rotating vortices. Physics Fluids, 2002, 14: 2757-2766
- [4] 王玉清, 朱永祺. 双热带气旋相互作用的机制分析及数值研究(二): 数值模拟. 大气科学, 1992, 16(6): 659-668
Wang Yuqing, Zhu Yongqi. Mechanism analysis and numerical study on the interactions of binary tropical cyclones part II: numerical simulation. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1992, 16(6): 659-668
- [5] Chang S W. A numerical study of the interactions between two tropical cyclones. Mon Wea Rev, 1983, 111: 1806-1817
- [6] 罗哲贤, 马镜娴. 副热带高压南侧双台风相互作用的数值研究. 气象学报, 2001, 59(4): 450-457
Luo Zhexian, Ma Jingxian. Binary tropical cyclone interactions on the south of an idealized subtropical ridge. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2001, 59(4): 450-457
- [7] 田永祥, 寿绍文. 双 TC 相互作用的研究. 气象学报, 1998, 56(5): 654-663
Tian Yongxiang, Shou Shaowen. Investigation on interaction of binary tropical cyclones. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1998, 56(5): 654-663
- [8] 魏鼎文, 张捷迁. 双台风相互作用的流体动力学模拟试验研究. 中国科学 B 辑, 1983, 1: 86-94
Wei Dingwen, Zhang Jieqian. A hydrodynamics numerical study on the interaction of binary tropical cyclones. Chinese Science B (in Chinese), 1983, 1: 86-94
- [9] Lander M, Holland G J. On the interaction of tropical cyclone scale vortices. I: observations. Quart J Roy Meteor Soc, 1994, 119: 1347-1361
- [10] 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
- [11] Ziv B, Alpert P. Rotation of mid-latitude binary cyclones: a potential vorticity approach. Theore Appl Climatology, 2003, 76: 189-202
- [12] Wu C, Huang T, Huang W, et al. A new look at the binary interaction: potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of tropical storm Bopha (2000) and its interaction with supertyphoon Saomai (2000). Mon Wea Rev, 2003, 131: 1289-1300
- [13] 邓秋华. "98.7" 鄂东南持续特大暴雨的分析. 见: 暴雨·灾害(三). 北京: 气象出版社, 1999. 115-124

- Deng Qihua. Analysis on the successive extremely heavy rain in east Hubei Province in July 1998. In: Storm & Disaster (Volume 3). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 115-124
- [14] Simpson S E, et al. Meso scale interactions in tropical cyclogenesis. Mon Wea Rev, 1997, 125: 2643-2661
- [15] 徐祥德, 陈联寿等. TCM - 90 现场科学试验台风 Flo β “陀螺” “通风流”非对称动力结构特征. 气象学报, 1996, 54(5): 536-543
- Xu Xiangde, Chen Lianshou, Xie Yiyang, et al. The asymmetric dynamic structure of the “ β top” dipole and “ventilation flow” of the target typhoon flo during TCM - 90 field experiment. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1996, 54(5): 536-543
- [16] 田永祥. 斜压涡旋中的通风流与热带气旋移动的关系. 气象学报, 1996, 54(1): 83-94
- Tian Yongxiang. Ventilation flow in a baroclinic vortex related to tropical cyclone motion. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1996, 54(1): 83-94
- [17] 陈联寿, 罗哲贤. 影响热带气旋结构和运动的两类因子的数值研究. 气象学报, 1996, 54(4): 409-416
- Chen Lianshou, Luo Zhexion. Numerical study on the impact of two kinds of factors on tropical cyclone's structure and motion of typhoons. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1996, 54(4): 409-416
- [18] 周秀骥. 21 世纪的大气科学——纪念中国气象学会成立 70 周年. 气象学报, 1994, 52(3): 257-260
- Zhou Xiuj. Atmospheric sciences in 21th century——in memory of the 70th anniversary of the foundation of Chinese Meteorological Society. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1994, 52(3): 257-260
- [19] 丑纪范. 大气科学中的非线性和复杂性. 北京: 气象出版社, 2002. 204pp
- Chou Jifan. Nonlinearity and Complicity in Atmospheric Sciences. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 204pp

A STUDY ON THE INTERACTION OF NON - AXISYMMETRIC BINARY VORTICES

Shen Wu^{1,2} Zhou Jialing^{1,3} Ma Jingxian¹ Chen Lianshou⁴ Luo Zhexion¹

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Zhejiang Meteorological Science Research, Hangzhou 310017

3 Jiangsu Meteorology Observatory, Nanjing 210008

4 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

Abstract

In the context of advection dynamics, nineteen experiments are performed using a quasi-geostrophic barotropic vorticity equation model to explore the condition for binary-vortex mergence, and the self-organization of the vortex of larger scale. Results show that the initial distance between the two vortices and the non-axisymmetric distributions of initial vorticity were two factors affecting the merger of binary-vortex. The self-organization process can be classified into two types. One type is that undergoing the processes of slowly change, rapid change, and the formation, stretch, and development of the fringe wing of vortex, two identical axisymmetric initial vortices merged into an symmetric vortex, with its vorticity piled up in the inner region coming from the two initial vortices, and in the spiral band in the outer region from the stretch of fringe wings. And the other is the merging of the two non-axisymmetric initial vortices of an elliptic vortex and an eccentric vortex, that is to say, in the interaction process of the binary-vortex, the elliptic vortex on one hand mutually rotated, on the other hand moved towards the center of the computational domain, expanded its vorticity range, and formed the inner core region of resultant vortex; and the eccentric vortex mutually rotated, meanwhile continuously stretched, finally formed the spiral band of resultant vortex.

Key words: Vortex, Mergence, Self-organization.