

斜压大气中台风涡旋自组织的研究^{* 1}

滕代高^{1,2} 罗哲贤¹ 李春虎³ 余 晖⁴ 代 刊¹
TENG Daigao^{1,2} LUO Zhexian¹ LI Chunhu³ YU Hui⁴ DAI Kan¹

1. 南京信息工程大学气象灾害重点实验室, 南京, 210044

2. 浙江省气象台, 杭州, 310017

3. 山东省气象局, 济南, 250031

4. 上海台风研究所, 上海, 200030

1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017, China*

3. *Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China*

4. *Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030, China*

2006-07-24 收稿, 2006-10-09 改回.

Teng Daigao, Luo Zhexian, Li Chunhu, Yu Hui, Dai Kan. 2008. Typhoon vortices self-organization in a baroclinic environment. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(1):71-80

Abstract A study is made for typhoon vortices self-organization in a baroclinic environment based on eight groups of numerical experiments with the fifth generation PSU/NCAR mesoscale numerical model MM5(V3) in this paper. The main results show that: in Experiment 1, there are only two separated meso-scale axisymmetric vortices with a radius 500 km, and the distance between the two separated meso-scale axisymmetric vortices is 400 km in the initial relative vorticity field. With the increase of model integration time, the two separated meso-scale axisymmetric vortices in initial field mutually exclude each other during the co-rotation, that is to say, the distance between the two initial axisymmetric vortices increases with the model integration time increasing. And finally, the two initial vortices exclude each other to an extent that the distance between them is greater than a critical distance, i. e. co-rotating critical distance, and the two vortices stop to co-rotate. In Experiment 2, there are a small vortex with a radius 80 km between two meso-scale axisymmetric vortices in the initial field and the other initial conditions are kept the same with Experiment 1. This dynamic system contains the interactions between vortices of the same and different scales. The two initially separated meso-scale axisymmetric vortices approach each other during their co-rotation, and self-organize into a typhoon-like/larger-scale vortex consisting of an inner core and spiral bands. This result supports both Zhou Xiuji's point of view in 1994 and the research results of this kind of previous studies in a barotropic framework. Experiments 3-8 are the sensitive experiments of initial vortex parameters based on Experiments 1 and 2. Among them, the effect of different initial positions of the small scale vortex on the typhoon vortex self-organization is tested in Experiments 3 and 4, and the influences of the distance and intensities of the initially axisymmetric binary meso-scale vortices are examined in Experiments 5 and 6, and 7 and 8, respectively. The results suggest that among all those initial vortex parameters, the distance between the initial axisymmetric meso-scale vortices is the most important parameter that influences the self-organizing process of the final typhoon-like vortex most. This conclusion is similar with the result of corresponding barotropic model experiments.

Key words Self-organization, Small-scale vortex, Meso-scale vortex, Typhoon vortex, Three-dimensional vortex

摘 要 文中利用 MM5(V3), 实施了 8 个数值试验, 对斜压大气中台风涡旋自组织的问题进行了初步研究。结果表明: (1) 在试验 1 中, 没有引进一个半径为 80 km 的小涡旋, 两个初始分离的半径为 500 km 的轴对称涡旋, 一边互旋, 一边相互排斥,

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(40333028)和上海台风基金项目(20060601)。

作者简介: 滕代高, 主要从事天气动力学研究。E-mail: 520tdg@163.com

两个涡旋中心之间的距离不断加大,致使双涡最终分离。(2)在试验 2 中引进了一个半径为 80 km 的小涡旋,其他条件同试验 1,两个初始分离的轴对称涡旋一边互旋,一边相互逼近,经自组织形成了一个由内区和螺旋带组成的类似于台风环流的较大尺度的涡旋。这个结果支持周秀骥在十多年前提出的重要观点,也支持以往在正压框架内的同类研究结果。(3)试验 3—8 为在前两个试验的基础上取不同初始涡旋参数的敏感性试验,其中,试验 3 和 4 为引入小涡旋不同初始位置对台风涡旋自组织的影响,试验 5 和 6 为不同初始轴对称双涡间距对台风涡旋自组织的影响,试验 7 和 8 反映了不同初始轴对称双涡强度对台风涡旋自组织的作用。它表明对涡旋自组织过程影响最大的涡旋初始参数是涡旋之间的距离,其与正压模式中的结果是类似的。

关键词 自组织,小涡旋,中尺度涡旋,台风涡旋,三维涡

中图法分类号 P458.1+24

1 引言

20 世纪 90 年代中期,周秀骥(1994)在展望 21 世纪大气科学发展时指出:今后将建立中尺度的全球变化动力学数值模式,该模式中包含着每一块积云的生成和发展,在一定条件下,一块积云的发展可能引起区域性天气发生实质性的显著变化。后来,周秀骥等(2006)分析了一个 γ 中尺度涡块对涡自组织的作用。无 γ 中尺度涡块时,两个 β 中尺度涡分离;引进一个 γ 中尺度涡块后,两个 β 中尺度涡经自组织形成了一个类似于台风环流的较大尺度的涡旋。最近,罗哲贤(2005)分析了多尺度系统中涡旋自组织的问题。结果表明: γ 中尺度涡层次涡相互作用的结果可以影响到 β 中尺度涡层次的相互作用,或者使两个 β 中尺度涡合并,或者使两个 β 中尺度涡分离。 β 中尺度涡层次涡相互作用的结果又进而影响到天气尺度层次的台风形成与否,最终影响到台风结构、强度和路径变化的宏观行为。Luo 等(2006)对 γ 中尺度涡块的作用做了进一步的研究。

周秀骥等(2006)、罗哲贤(2005)和 Luo 等(2006)是根据周秀骥(1994)的思路开展的初步研究。这些研究与周秀骥(1994)的思路是通过如下的假定连结起来的,即假设涡块与云块的作用相当。这个假定的根据是,在复杂的数值模式中,涡块和云块的位置相当(Chen, 2001)。因而先分析较简单的涡块的作用。这些研究需要不断的完善。首先,周秀骥等(2006)、罗哲贤(2005)和 Luo 等(2006)所用的模式或者是准地转正压模式,或者是正压原始方程模式。应该用更复杂的模式来继续分析。其次,需要放弃上述假设,直接用云模式分析云块对涡自组织的影响。本文用 PSU/NCAR 第 5 代中尺度数值天气预报模式 MM5(V3),分析了一个小涡旋对涡自组织的影响。结果表明,周秀骥等(2006)、罗哲贤(2005)和 Luo 等(2006)的主要结论在更复杂的

模式中仍然成立。

2 模式和试验设计

2.1 模式和边、初值条件

MM5(V3)(Grell, et al., 1995)是在地形跟随的 σ 坐标中求解非静力大气运动方程,并提供有多种参数化方案。本文利用该模式在理想条件下(无环境流)做两重双向嵌套试验,内区和外区格距分别是 20 km 和 60 km,相应的格点为 101×101 和 253×253 。垂直方向取 17 个 σ 层, σ 的取值分别为 1.00、0.99、0.98、0.96、0.94、0.91、0.88、0.85、0.82、0.77、0.66、0.55、0.44、0.33、0.22、0.11、0.00。模式顶气压为 100 hPa。所有试验均积分 120 h,每隔 6 h 输出一次模拟结果,积分时步为 180 s。采用 Grell 对流参数化方案(Grell, et al., 1995)和 Blackard 行星边界层方案。上、下边界垂直速度为 0.0,侧边界取时间依赖边条件(Grell, et al., 1995)。

初始中尺度涡旋由下式决定(Wang, et al., 1996)

$$V_M(r, \sigma) = \begin{cases} V_m \left(\frac{r}{r_m} \right) \exp\left(1.0 - \left(\frac{r}{r_m}\right)\right) \times \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma + 0.2}{1.2}\right) & r \leq r_c \\ 0 & r > r_c \end{cases} \quad (1)$$

相应的涡度廓线为

$$\xi_M(r, \sigma) = \begin{cases} \left(\frac{2.0V_m}{r_m}\right) \left(1.0 - \frac{0.5r}{r_m}\right) \exp\left(1.0 - \frac{r}{r_m}\right) \times \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma + 0.2}{1.2}\right) & r \leq r_c \\ 0 & r > r_c \end{cases} \quad (2)$$

式中 r 为距涡旋中心的距离, r_c 为涡旋尺度参数, V_m 为地表最大切向风速, r_m 为涡旋中心到出现 V_m 的距离。

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (3)$$

这里, p 为某一气压层气压, p_t 为模式顶气压, p_s 为模式底气压。

初始小涡旋由下式给出(Montgomery, et al., 1998), 其中垂直结构部分采用了 Wang 等(1996)的形式,

$$\xi_y = \xi_{\max} \times \begin{cases} \sin^2\left(\frac{\pi(\delta r - \Delta)}{2\Delta}\right) \times \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma + 0.2}{1.2}\right) & \delta r \leq \Delta \\ 0 & \delta r > \Delta \end{cases} \quad (4)$$

式中, ξ_{\max} 为小涡旋中心的最大相对涡度值, δr 为距涡块中心的距离, $\delta r = \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}$, Δ 为小涡旋尺度参数。参数取值: $V_m = 32.0 \text{ m/s}$, $r_m = 100.0 \text{ km}$, $r_c = 500 \text{ km}$, $p_s = 1010 \text{ hPa}$, $p_t = 100 \text{ hPa}$, $\xi_{\max} = 1.74 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $\Delta = 80.0 \text{ km}$ 。

从以上的参数取值可以看到, 初始时刻中尺度涡旋的面积约为小涡旋面积的 39 倍。本文的主要目的就是探讨这种在尺度上相差很大的中尺度涡旋与一个小涡旋之间相互作用的结果。这种相互作用是自组织形成的, 是非线性的结果, 在引入这种相互作用以后, 可以引起准终态流型实质性的显著变化。

2.2 模式的初始化

对于无环境流的理想试验, 要求模式初值中不存在气压和温度的水平梯度(Zhang, 2004), 海表温度、气压层温度和湿度廓线参照 Duan 等(2004)的方法给定, 相应的位势高度场由静力平衡方程通过气压和温度求出。通过求解泊松方程, 从初始涡度场可以求得初始流函数场, 再由流线方程求取初始风场, 初始涡度场由下式给出:

$$\xi(x, y, \sigma) = \xi_{\text{MW}}(x, y, \sigma) + \xi_{\text{ME}}(x, y, \sigma) + \xi_y(x, y, \sigma) \quad (5)$$

这里, ξ 表示初始总涡度, ξ_{MW} 表示初始中尺度西涡, ξ_{ME} 表示初始中尺度东涡, ξ_{MW} 与 ξ_{ME} 除了初始位置不同, 其余完全相同, 均由式(2)决定, ξ_y 为初始小涡旋, 由式(4)决定。关于给定 MM5 理想试验初值场的具体步骤参见 Chuang 等(2000)的文章。

2.3 试验设计

试验 1: 基础试验, 即两个中尺度涡旋分离的试验。该试验中, 在初始场上只有由式(5)确定的两个中尺度涡旋, 即 $\xi_y = 0$ 。如图 1a 中的涡 A 和 B, 涡 A 和 B 的中心间距为 400 km。为了讨论问题方便, 所有试验中, 初始时刻的涡度场上我们只给出正的涡度分布。

试验 2: 在试验 1 的基础上, 引入中尺度涡旋与一个小涡旋的相互作用。在该试验中, 初始时刻的相对涡度场由式(5)决定, 如图 2a 中的涡 A、B 和小涡旋 C, 其中, 涡 A 和 B 的中心间距为 400 km, 小涡旋 C 位于涡 A 和 B 中心连线的中点上。试验 2 与试验 1 的差别仅仅在于在试验 2 的初始场上多了一个小涡旋 ξ_y 。

试验 3—8 为敏感性试验。试验 3 和 4 为小涡旋 C 位于双涡连线中点 o 正北和正南 500.0 km 处的试验, 即小涡 C 不同位置对涡旋自组织影响的试验。试验 5 和 6 为双涡试验中不同涡间距对涡旋自组织的影响试验。试验 7 和 8 为双涡试验中不同最大风速值对涡旋自组织影响的试验(表 1)。

表 1 试验方案设计
Table 1 8 experiment schemes

试验	V_m (m/s)	d_{AB} (km)	d_{oC} (km)	r_c (km)	Δ (km)
1	32.0	400.0		500.0	
2	32.0	400.0	0.0	500.0	80.0
3	32.0	400.0	500.0(North)	500.0	80.0
4	32.0	400.0	500.0(North)	500.0	80.0
5	32.0	360.0		500.0	
6	32.0	440.0		500.0	
7	36.0	400.0		500.0	
8	28.0	400.0		500.0	

注: 表中, d_{AB} 为初始场上两个中涡旋之间的距离。 d_{oC} 为小涡 C 距涡 A 和 B 连线中点 o 的距离。

3 结果分析

3.1 斜压大气中中尺度涡旋与小涡旋的相互作用和自组织结构的形成

图 1 和 2 分别为试验 1 和 2 中 700 hPa 上相对涡度场的时间演变。试验 1、2 中, 涡旋 A、B 一边互旋, 一边向偏西方向移动。为图示清楚起见, 图 1、2 采用了移动坐标。可见:

(1) 在两个试验的初始场上涡 A 和 B 皆为轴对称的中尺度涡旋(图 1a 和 2a)。而在准终态场上, 试验 1 基本上维持了初态时的轴对称的双涡(图 1f), 试验 2 则形成了一个具有完整螺旋带的台风环流 G(图 2e)。

(2) 两个试验中都有双涡互旋现象产生, 但试验 1 中互旋只维持了 48 h(图 1a—1c), 试验 2 中互旋现象一直持续到自组织过程的完成。在互旋的速度上, 试验 2 明显较试验 1 快。积分 48 h, 试验 1 只

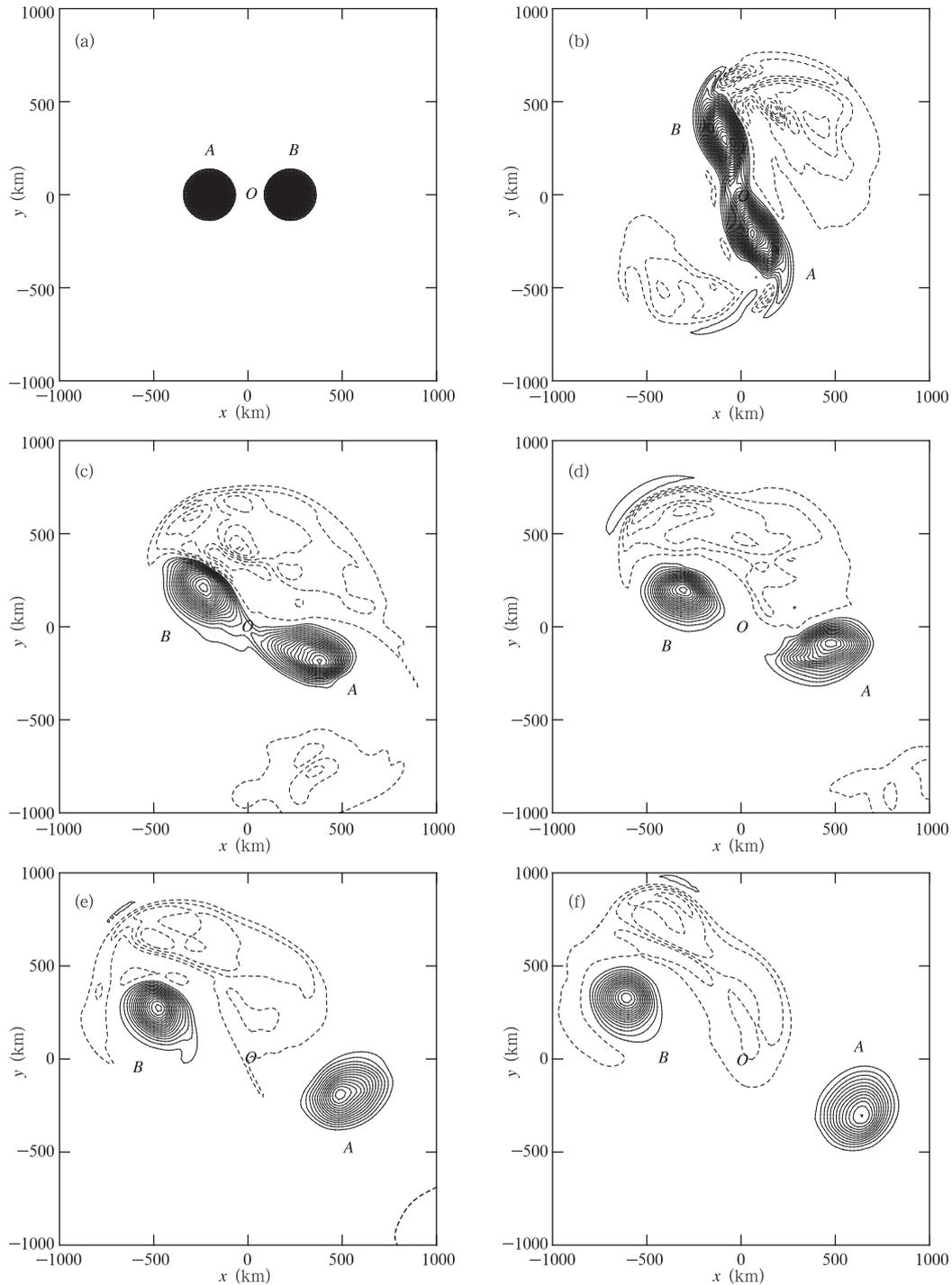


图1 试验1中,700 hPa上相对涡度随时间的变化

(a. $t=0$ h, b. $t=24$ h, c. $t=48$ h, d. $t=72$ h, e. $t=96$ h, f. $t=120$ h, 实(虚)线为正(负)值, 等值线间隔 $0.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, O 为计算区域中心, $t=0$ h 时只给出大于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的等值线)

Fig. 1 Temporal evolution of 700 hPa relative vorticity field $\zeta(x, y)$ in Exp1

(a. $t=0$ h, b. $t=24$ h, c. $t=48$ h, d. $t=72$ h, e. $t=96$ h, f. $t=120$ h, Solid (dash) lines denote the positive (negative) vorticity, respectively, and the contour interval $= 0.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. O represents the center of the computational area, only contours greater than $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ are plotted at $t=0$ h)

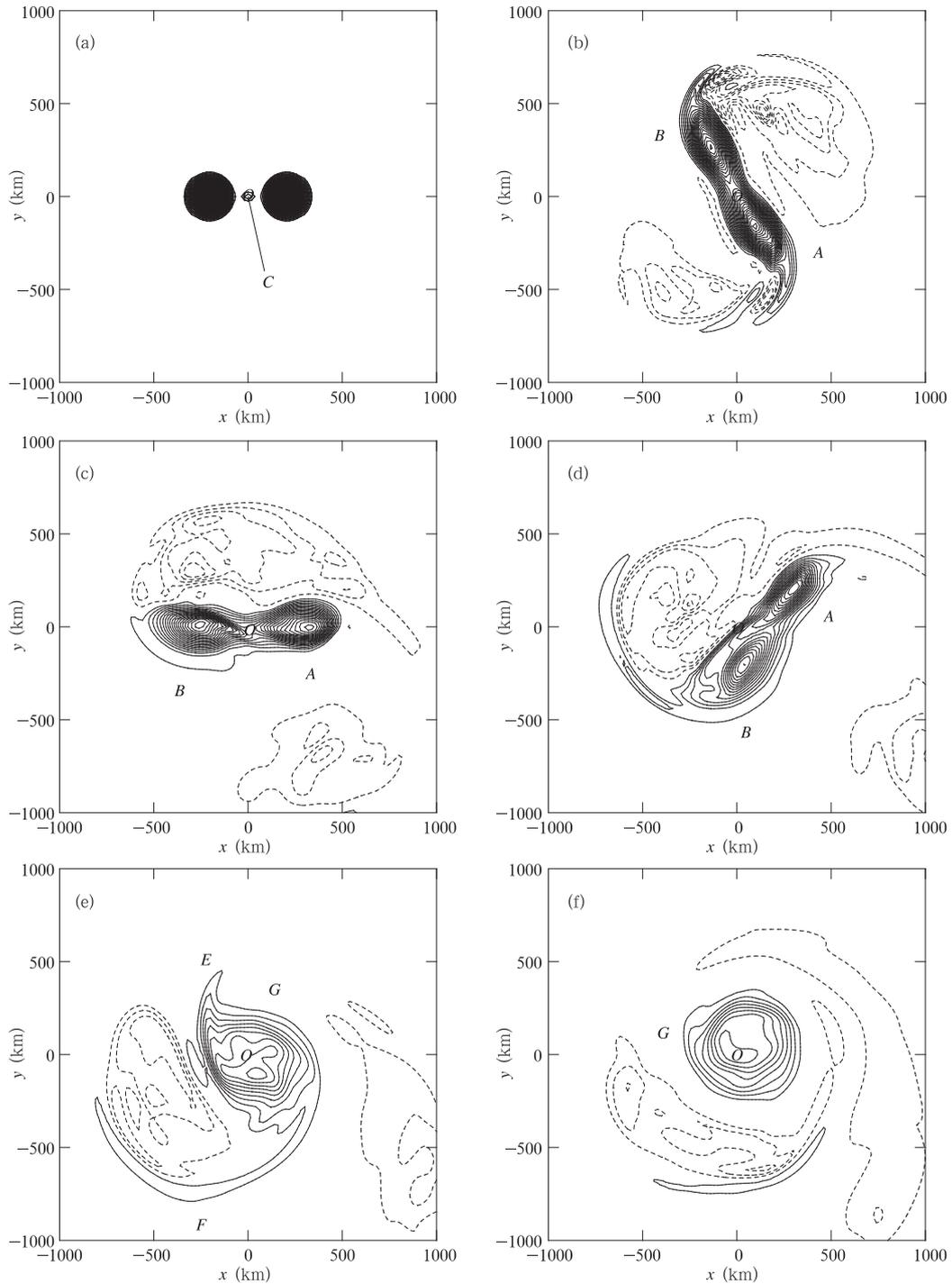


图2 试验2中,700 hPa上相对涡度随时间的变化

(a. $t=0$ h, b. $t=24$ h, c. $t=48$ h, d. $t=72$ h, e. $t=96$ h, f. $t=120$ h, 实(虚)线为正(负)值, 等值线间隔 $0.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, O 为计算区域中心, $t=0$ h 时只给出大于 $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的等值线)

Fig. 2 Temporal evolution of 700 hPa relative vorticity field $\zeta(x, y)$ in Exp2

(a. $t=0$ h, b. $t=24$ h, c. $t=48$ h, d. $t=72$ h, e. $t=96$ h, f. $t=120$ h, Solid (slash) lines denote the positive (negative) vorticity, respectively, and the contour interval $= 0.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. O represents the center of the computational area, only contours great than $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ are plotted at $t=0$ h)

互旋了大约 150° (图 1c), 试验 2 则互旋了 180° 左右 (图 2c)。

(3) 两个试验中初始场上的负涡度区在积分 24 h 模式时以后, 均拉伸为两部分分布在涡 A 和 B 两侧 (图 1 和图 2b—2c), 差别在于两个试验中积分 48 h 时位于双涡南侧的负涡度区 (图 1c 和 2c) 在以后的积分时间里是否仍然继续存在: 在试验 1 中积分 48 h 以后, 48 小时时位于双涡南侧的负涡度区逐渐消失, 48 小时位于双涡北侧的负涡度区有所发展, 并逐渐拉伸环绕在涡 B 周围, 阻挡了涡 A 与 B 之间的相互作用 (图 1d—1f)。而在试验 2 中, 该负涡度区则始终维持在双涡两侧, 并随着自组织过程的完成南北两块负涡度区进一步拉伸连接在一起, 环绕在自组织形成的新的台风环流周围 (图 2d—2f)。

(4) 尺度上的差异, 试验 1 中, 初始场和准终态场上的涡旋尺度均为 500 km 左右 (图 1a 和 1f), 尺度上基本没有变化。试验 2 中, 初始涡旋的尺度同试验 1 大约为 500 km (图 2a), 而准终态涡的尺度明显加大 (图 2e 中 E、F 之间的距离), 为初始涡旋尺度的 2—3 倍。

本文的结果与周秀骥等 (2006) 的结果是相似的, 即没有引入中尺度涡旋与小涡旋的相互作用时 (本文图 1 和周秀骥等 (2006) 的图 2), 初始场和准终态场上双涡的特征尺度基本不变, 没有出现涡旋自组织的现象, 双涡分离。在引入中尺度涡旋与小涡旋的相互作用以后, 有清楚的涡旋自组织现象的发生 (图 2 和周秀骥等 (2006) 的图 3)。两个自组织过程都涉及到 3 种空间尺度: ① 初始中尺度涡旋。② 初始小涡旋。③ 自组织起来的类似于台风结构的天气尺度涡旋 (图 2e 和周秀骥等 (2006) 的图 3h)。

以上图 1 和 2 给出的是斜压大气中台风涡旋自组织的初步结果, 它表明周秀骥等 (2006) 提到的在正压大气中的自组织现象在斜压情况下仍然可以成立, 周秀骥等 (2006) 的结果是正压的, 整层的情况不清楚。

3.2 斜压大气中台风涡旋自组织过程的三维结构

图 3 为试验 1 中初始时刻和积分 120 h 模式时对流层低层 850 hPa, 对流层中层 500 hPa, 以及对流层高层 300 hPa 相对涡度场的分布。有如下特征:

(1) 初始场上对流层不同层次上均为轴对称的双涡, 准终态场上对流层中、低层上的双涡基本上仍然维持轴对称的结构, 而对流层高层 300 hPa 上位于东南象限的涡旋有小涡片生成, 但涡旋主体仍维持轴对称形状。

(2) 积分 120 h 模式时, 不同对流层上负涡度区的分布不同, 但有一个共同特征, 即在双涡的中间均分布着负涡度区。

(3) 初始场上对流层各层上双涡间距均为 400 km (图 3a), 准终态场上对流层各层上双涡间距大约为 1300 km, 即双涡分离。

(4) 尺度的变化: 对比图 3a 和 3b, 初始场上和准终态场上对流层中、低层涡旋的特征尺度基本上维持在 500 km 左右, 说明初态和终态在有效尺度上变化不大。

(5) 自组织现象没有发生。

图 4 为试验 2 中不同对流层 (850, 500 和 300 hPa) 上初始时刻和积分 96 h 模式时的相对涡度场分布。可见:

(1) 初始场上对流层各层上皆分布着两个轴对称的中尺度涡旋和一个轴对称的小涡旋 (图 4a)。

(2) 与试验 1 (图 3b) 截然不同, 准终态场上在对流层中、低层 500 和 850 hPa 上是一个自组织起来的新的具有完整螺旋带的台风结构, 而在高层 300 hPa 上则是分布着一些离散的涡量带。

(3) 准终态场上负涡度带仍然是分布在正涡度区的周围。

(4) 尺度上的变化: 初始场上对流层中、低层 500 和 850 hPa 上正涡度区的特征尺度 $L_0 \approx 500$ km (图 4a), 准终态场上对流层低层 850 hPa 上自组织起来的新的台风结构的特征尺度 $L_0 \approx 1000$ km, 对流层中层 500 hPa 上自组织起来的新的台风结构的特征尺度 $L_0 \approx 1300$ km, 而对流层高层 300 hPa 上则是一个狭长的涡量带。

(5) 积分到 120 h 模式时, 对流层中、低层 500 和 850 hPa 上在 $t=96$ h 时自组织形成的新的类台风涡旋经历着一次轴对称化过程, 而 300 hPa 上仍然维持着离散的涡片分布 (图 5)。

图 4 表明, 试验 2 中涡旋相互作用的过程在不同对流层上有不同的表现形式。这种情形在图 6 中可以得到进一步的说明。初态时涡 A、B 和 C 均为轴对称的结构 (图 6a)。积分 96 h (图 6b), 500 hPa 以下自组织过程已经完成, 500—300 hPa, 双涡仍然处于互旋之中, 而在 300 hPa 以上, 则是分布着一些离散的小涡块。

从以上的分析我们可以看到, 周秀骥等 (2006) 在正压条件下提出的主要结果 (周秀骥等 (2006) 的图 2 和 3) 基本上反映了斜压大气中台风涡旋自组织的主要过程, 但是在对流层不同层次上涡旋相互

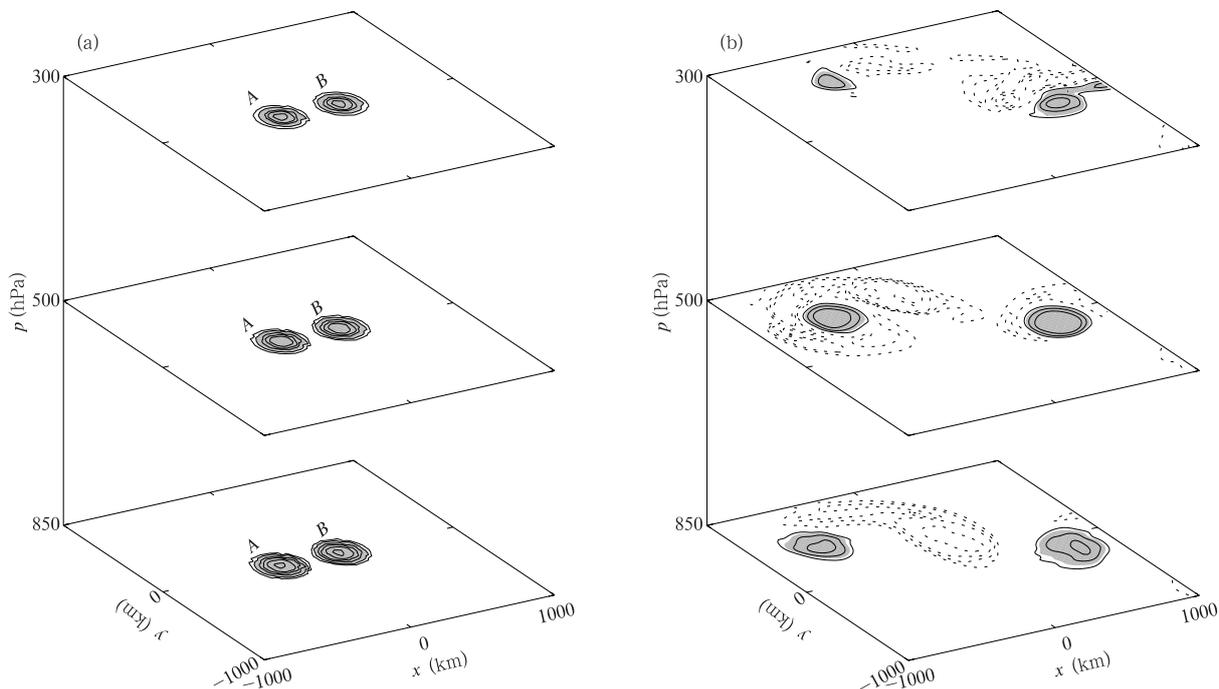


图3 试验1中,初始时刻与积分120h不同气压层上相对涡度场的分布

(a. $t=0$ h, b. $t=120$ h, 等值线: $-10e-05, -5e-05, -3e-05, -2e-05, -1e-05, 0, 1e-05, 2e-05, 3e-05, 5e-05, 1e-04, 5e-04, 10e-04, 20e-04$, 阴影区等值线 $\geq 2e-05$, 单位: s^{-1})

Fig. 3 850, 500, and 300 hPa relative vorticity distributions at $t=0$ and 120 h in Exp1

(a. $t=0$ h, b. $t=120$ h. Contours: $-10e-05, -5e-05, -3e-05, -2e-05, -1e-05, 0, 1e-05, 2e-05, 3e-05, 5e-05, 1e-04, 5e-04, 10e-04, 20e-04$; shaded areas $\geq 2e-05$; unit: s^{-1})

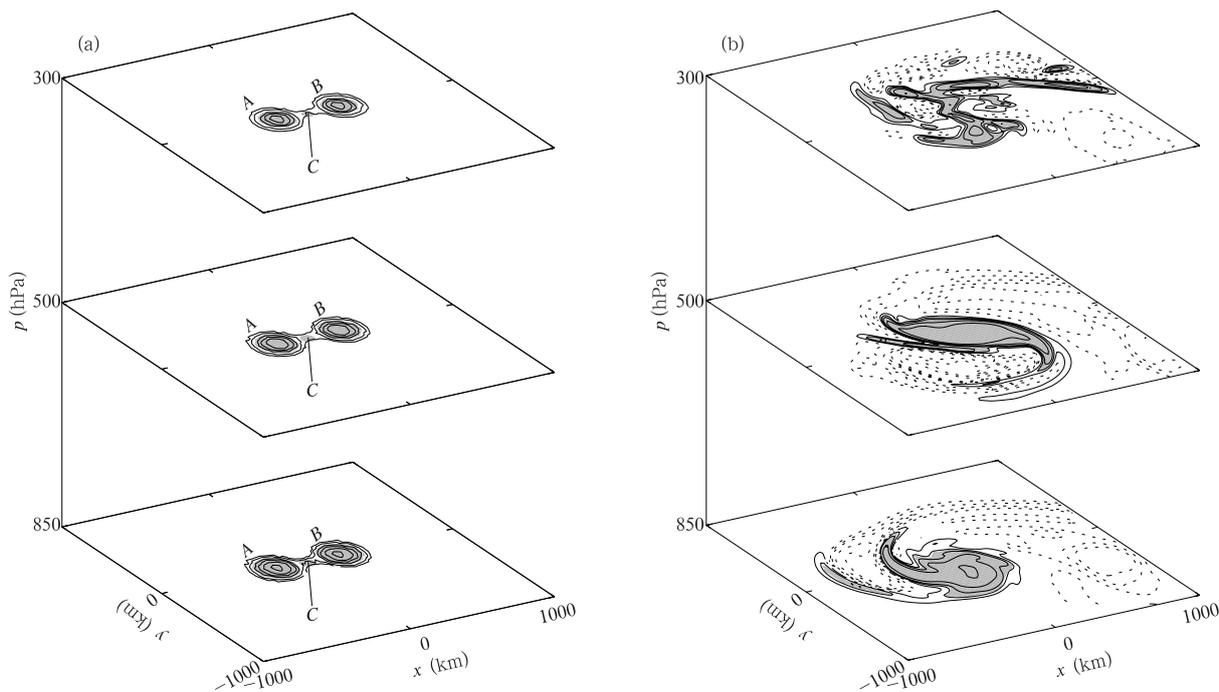


图4 试验2中,初始时刻与积分96h不同气压层上相对涡度场的分布

(a. $t=0$ h, b. $t=96$ h, 等值线: $-10e-05, -5e-05, -3e-05, -2e-05, -1e-05, 0, 1e-05, 2e-05, 3e-05, 5e-05, 1e-04, 5e-04, 10e-04, 20e-04$, 阴影区等值线 $\geq 2e-05$, 单位: s^{-1})

Fig. 4 Same as Fig. 3 but in Exp2 and (b) $t=96$ h

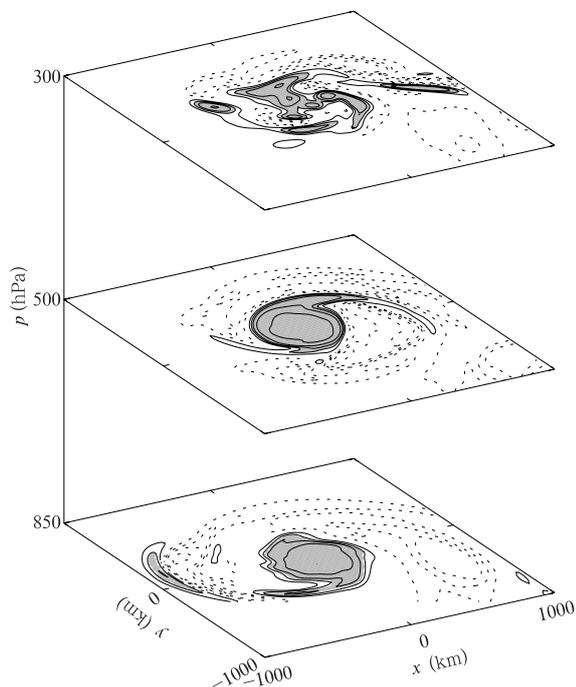


图5 试验2中,积分120 h不同气压层上
相对涡度场的分布

(等值线: $-10e-05$, $-5e-05$, $-3e-05$, $-2e-05$, $-1e-05$, $0.1e-05$, $2e-05$, $3e-05$, $5e-05$, $1e-04$, $5e-04$, $10e-04$, $20e-04$, 阴影区等值线 $\geq 2e-05$, 单位: s^{-1})

Fig. 5 Same as Fig. 3 but in Exp2

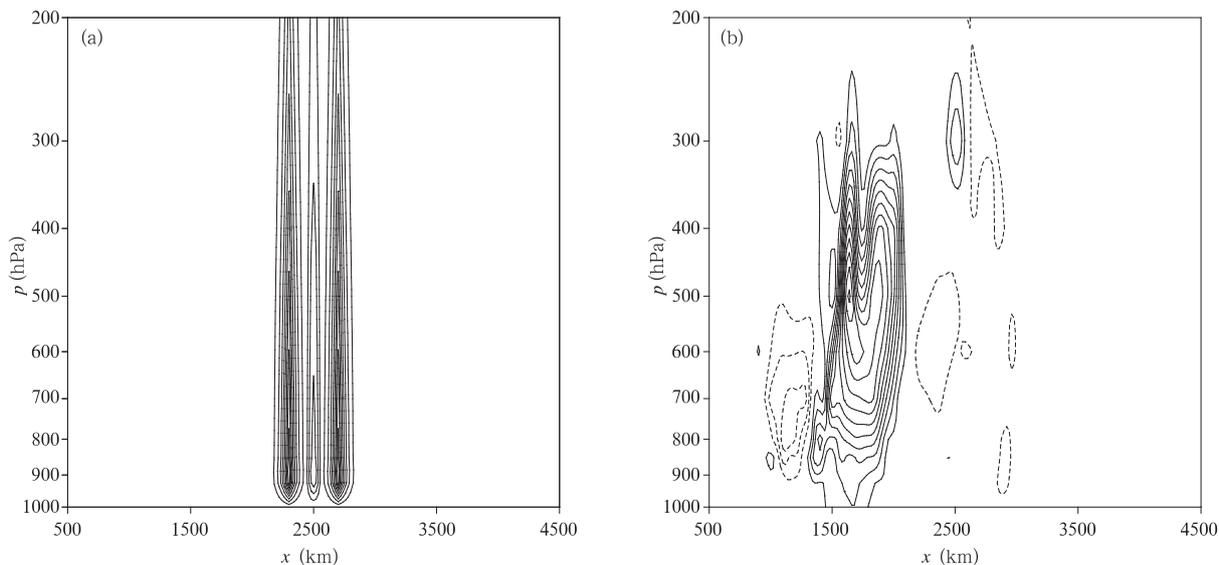


图6 试验2中,初始时刻与积分96 h相对涡度场的纬向-垂直剖面

(a. $t=0$ h, b. $t=96$ h, (a)中中尺度涡旋的等值线间隔为 $2.0 \times 10^{-4} s^{-1}$,
小涡旋等值线间隔为 $0.5 \times 10^{-4} s^{-1}$, (b)中等值线间隔为 $0.2 \times 10^{-4} s^{-1}$)

Fig. 6 Latitude-vertical cross-sections of relative vorticity in Exp2 at $t=0$ and 96 h

(a. $t=0$ h, b. $t=96$ h, the contour interval is $2.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ for meso-scale vortices
and $0.5 \times 10^{-4} s^{-1}$ for small-scale vortex in (a) but $0.2 \times 10^{-4} s^{-1}$ in (b))

作用的差异以及类台风涡旋自组织过程在不同对流层上的表现形式则不能体现出来。

3.3 斜压性在台风涡旋自组织过程中的作用

据试验2的结果,同时与周秀骥等(2006)的结果相比较(周秀骥等(2006)的图3),可以看到斜压性对台风涡旋的自组织过程有如下作用:

(1) 不同对流层上涡旋相互作用表现出不同的特征。① 对流层高层300 hPa上引入中尺度涡旋与小涡旋的相互作用并不能使原本分离的双涡发生自组织现象,而是使原本分离的双涡离散为许多狭长的小尺度涡量带。② 引入中尺度涡旋与小涡旋的相互作用以后可以使对流层中、低层500和850 hPa上原本分离的两个中尺度轴对称涡旋自组织形成一个新的具有完整螺旋带的台风环流结构。③ 由于斜压性的作用,使得对流层中层500 hPa和低层850 hPa上台风涡旋自组织的过程也存在差异:积分120 h模式时(图5),500 hPa上在 $t=96$ h时自组织起来的台风涡旋在轴对称化的过程中形成了非常清楚的两条螺旋带,而850 hPa上的台风涡旋则在轴对称化的过程中开始出现的螺旋带的断裂。

(2) 对比本文试验2与周秀骥等(2006)研究中B类试验的结果可见,周秀骥等(2006)的B类试验中(周秀骥等(2006)图2和3)均没有负涡度区的出现,而本文试验中存在明显的负涡度区,这是斜压

性带来的结果。

3.4 涡旋自组织过程中的强度变化特征

以上我们分析了小尺度涡旋与中尺度涡旋相互作用的引入对斜压大气中涡旋自组织过程的影响。同时,从图 1 和 2 的等值线的疏密程度可以大致看出,两类试验中涡旋的强度变化均经历了一个逐步衰减的过程。为进一步分析这一现象,我们给出了图 7、8 和 9。

可见,① 试验 1 和试验 2 中涡旋的强度总体上呈逐渐衰减的变化趋势。② 试验 1 中涡 A 的最大风速半径在前 48 h 大约增加了 50 km,之后基本保持不变(图 7)。③ 试验 2 中在双涡合并前涡 A

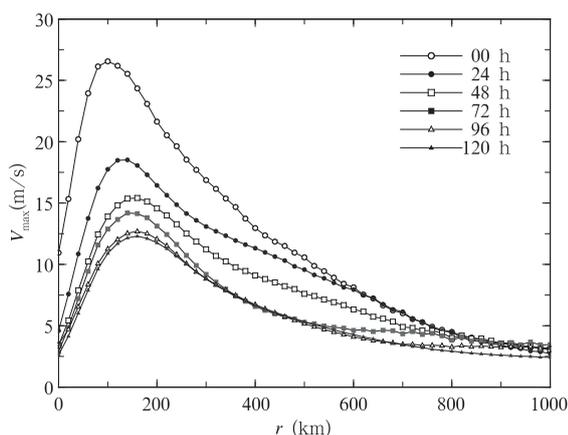


图 7 试验 1 中 700 hPa 上涡 A 每隔 24 h 的沿方位角平均的切向最大风速的径向分布(坐标原点取涡 A 中心)
Fig. 7 Radial distributions of 700 hPa azimuthal average maximum tangential wind velocity of vortex A at each 24 h during 0-120 hours in Exp1
(The origin of coordinates is the center of vortex A)

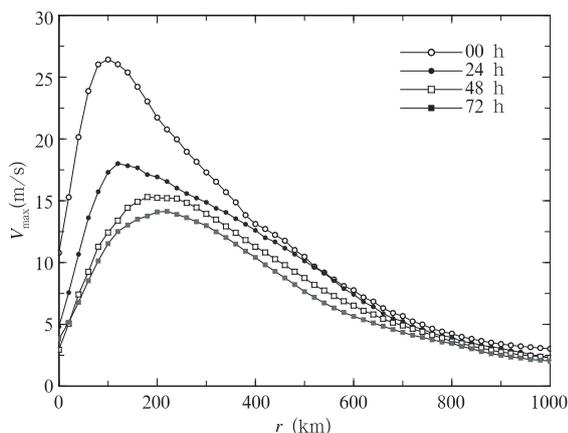


图 8 试验 2 中 700 hPa 上 0-72 h 每隔 24 h 的沿方位角平均的切向最大风速的径向分布
(坐标原点取涡 A 中心)
Fig. 8 Same as Fig. 7 but for 0-72 hours in Exp. 2

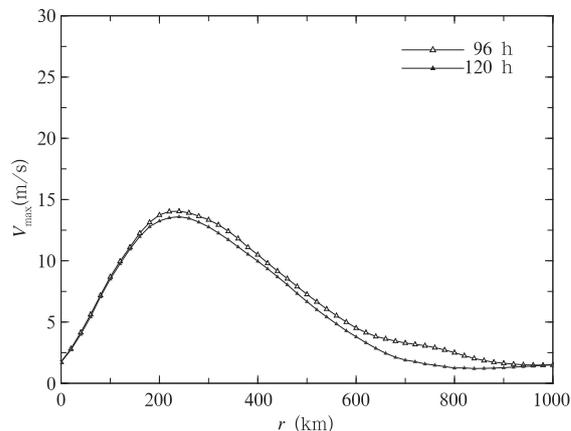


图 9 试验 2 中 700 hPa 上 $t=96$ 和 120 h 时沿方位角平均的切向最大风速的径向分布
(坐标原点取涡 G 中心)

Fig. 9 The radial distribution of 700 hPa azimuthal average maximum tangential wind velocity at $t=96$, and 120 h in Exp2
(The origin of coordinates is the center of vortex G)

的最大风速半径增加到大约 200 km(图 8, $t=72$ h),双涡合并后,涡 G 的最大风速半径在涡 A 的基础上进一步增加到 250 km 左右(图 9)。与初始时涡 A 的最大风速半径相比,尺度上发生了明显的变化。这个结果与图 1 和 2 的结果是一致的。④ 两个试验中合并前涡 B 的情况与涡 A 类似(图略)。

端义宏等(2005)总结了近年来热带气旋强度变化的若干研究成果。在已有的研究中(周秀骥等, 2006;罗哲贤, 2005; Luo 等, 2006), 涡并过程往往是一个强度不断增大的过程,这是守恒模式下的结果。而试验 1 和 2 是在无环境流条件下斜压天气模式中的结果。它表明:(1) 斜压天气模式中能量不守恒。(2) 斜压天气模式中存在各种耗散作用。(3) 在热带天气系统中,大尺度环境流是其强度维持的主要原因之一(陈联寿等, 1979)。所以,在试验 1 和 2 的积分过程中,由于能量的频散和各种耗散作用的存在。涡旋强度的变化必然是一个逐渐衰减的过程。

3.5 不同涡旋参数对涡旋自组织的影响

为了分析不同初始涡旋参数对涡旋自组织的影响,在试验 1 和 2 的基础上,我们设计了 6 个敏感性试验(试验 3-8,见表 1)。其中试验 3 和 4 为不同小涡位置对自组织的影响试验。试验 5 和 6 为不同双涡间距对涡旋自组织的影响。最后两个试验给出不同双涡初始强度对涡旋自组织的影响。结果表明(图略):(1)引入的小涡位于初始双 β 涡旋连线中点正北和正南 500 km 时,并不能使双 β 涡旋经自组织过程发生合并。其原因可能是小涡与中涡较大的间

距使得其相互作用比较小。(2)较小的双涡间距可以使双涡在互旋过程中发生合并(试验5),而较大的双涡间距则使得双涡的互旋速度减慢,互旋的角度减小并最终分离。这一结果与罗哲贤等(2001)在正压条件下的结论一致。(3)在试验1的基础上,双涡间距不变的情况下,增大(试验7)和减小(试验8)初始涡旋最大风速值并不能使自组织现象发生。而且在积分120h以后,具有较大的初始最大风速的试验7中双涡的间距也随之增加。

4 结 论

20世纪90年代中期,周秀骥(1994)在展望21世纪大气科学发展时就指出:今后将建立中尺度的全球变化动力学数值模式,该模式中包含着每一块积云的生成和发展,在一定条件下,一块积云的发展可能引起区域性天气发生实质性的显著变化。这一重要观点在周秀骥等(2006)、罗哲贤(2005)和Luo等(2006)研究中得到了证实。但是,这些工作都是在较为简单的正压理想模式中的研究结果。在更为复杂的斜压天气模式中周秀骥(1994)所提出的重要观点能否成立?这是本文讨论的主要问题,试验1和2的结果表明,在斜压大气中,中尺度涡旋与小涡旋相互作用的引进,可以使原本分离的初始轴对称两个中尺度涡旋在对流层中、低层自组织形成一个新的尺度更大的且具有明显螺旋带的台风环流,而在对流层高层使得涡旋系统演变为一组离散的涡片。这个结果进一步支持周秀骥(1994)提出的重要观点。敏感性试验的结果说明,在初始涡旋的参数取值中,对涡旋自组织过程影响最大的参数是涡旋之间的距离。

本文对试验结果的分析仅局限于对比相对涡度场形态的差异,缺乏对变化过程的机制分析。同时,涡旋相互作用是个非常复杂的问题,本文仅仅是提出了斜压大气中理想条件下(无环境流)的初步结果,仍然是理想试验下的问题。真实大气中双台风相互作用的问题涉及到诸如环境流的变化,多个中尺度涡参与的复杂运动(周嘉陵,2006a,2006b),是一个多尺度的复杂问题(罗哲贤,2005),需要对典型个例进行真实的模拟。这些都有待做进一步研究。

References

Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Generality on Typhoon in Western Pacific[M]. Beijing: Science Press. 156-157
 Chen Y, Yau M K. 2001. Spiral bands in a simulated hurricane Part 1: vortex Rossby wave verification. *J Atmos Sci*, 58: 2128-2145
 Chuang H Y, Sousounis P J. 2000. A technique for generating ide-

alized initial and boundary conditions for the PSU-NCAR model MM5. *Mon Wea Rev*, 128: 2875-2882
 Duan Yihong, Wu Rongsheng, Yu Hui, et al. 2004. The role of effect and a uniform current on tropical cyclone intensity. *Adv Atmos Sci*, 21(1): 75-86
 Duan Yihong, Yu Hui, Wu Rongsheng. 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(5): 636-645
 Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1995. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR, 122pp
 Luo Zhexian, Ma Jingxian. 2001. Binary tropical cyclone interaction the south of an idealized subtropical ridge. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 59(4): 450-458
 Luo Zhexian. 2005. A study on typhoon self-organization in a multi-scale coexisting system. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(5): 672-682
 Luo Z, Liu C. 2006. An investigation into the sensitivity of idealized vortex interactions to initial conditions and island topography. *Geophys Res Letters*, 33(1): L01807
 Montgomery M T, Enagonio J. 1998. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a three-dimensional quasi-geostrophic model. *J Atmos Sci*, 55: 3176-3207
 Wang Yuqing, Holland G J. 1996. The Beta drift of baroclinic vortices. Part I: Adiabatic vortices. *J Atmos Sci*, 53(3): 411-427
 Zingl G. 2004. A reexamination of the valley wind system in the Alpine inn valley with numerical simulations. *Meteorol Atmos Phys*, 87: 241-256
 Zhou Jialing, Ma Jingxian, Chen Lianshou, et al. 2006. A preliminary study on the self-organization process of multi-vortices. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 64(4): 464-473
 Zhou Jialing, Ma Jingxian, Chen Lianshou, et al. 2006. Influences of the initial structure and scale on the self-organization of vortices. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 64(5): 537-551
 Zhou Xiuji, Luo Zhexian, Gao Shouting. 2006. Two possible mechanisms for vortex self-organization. *Science in China Ser. D (in Chinese)*, 36(2): 201-208
 Zhou Xiuji. 1994. Atmospheric Sciences in 21th Century——in Memory of the 70th Anniversary of the Foundation of Chinese Meteorological Society. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 52(3): 257-260

附中文参考文献

陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 156-157
 端义宏, 余晖, 伍荣生. 2005. 热带气旋强度变化研究进展. *气象学报*, 63(5): 636-645
 罗哲贤, 马镜娴. 2001. 副热带高压南侧双台风相互作用的数值研究. *气象学报*, 59(4): 450-458
 罗哲贤. 2005. 多尺度系统中台风自组织的研究. *气象学报*, 63(5): 672-682
 周嘉陵, 马镜娴, 陈联寿等. 2006a. 多涡自组织的初步研究. *气象学报*, 64(4): 464-473
 周嘉陵, 马镜娴, 陈联寿等. 2006b. 初始涡的结构与尺度对涡旋自组织影响的研究. *气象学报*, 64(5): 537-551
 周秀骥, 罗哲贤, 高守亭. 2006. 涡旋自组织的两类可能机制. *中国科学(D辑)*, 36(2): 201-208
 周秀骥. 1994. 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*, 52(3): 257-260