

涡旋合并过程的数值研究^{*}

罗哲贤

(南京气象学院, 南京 210044)

徐祥德

陈联寿

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要 作者用正压原始方程模式, 研究了多个涡旋同时存在条件下涡旋的合并问题。在此场合, 除涡旋之间的距离以外, 涡旋是否合并取决于三类因子, 即涡旋数目、排列方式和强度分布。

关键词: 双涡旋; 多涡旋; 数值试验

1 引言

1998 年 7 月 20~22 日湖北省发生特大暴雨, 使长江中游抗洪形势非常严峻。据邓秋华等^[1]的研究, 这次特大暴雨过程中, 有 8 个中尺度云团活动。多个云团或多个强暴雨团的合并, 是形成强暴雨中心的一个直接原因。这次特大暴雨的数值试验^[2]表明, 新生的正涡度中心与新生云团在时间和位置上均十分接近。这样, 我们初步考虑, 在多个云团或多个正涡度涡旋同时存在的场合, 云团合并或涡旋合并过程, 可能在强暴雨中心的形成中起着重要作用。

两个正涡度涡旋合并机制问题, 在台风动力学的领域已取得重要进展^[3~5]。目前涉及到三个或三个以上涡旋合并问题的研究工作还十分少见。这是一个预测业务和防灾实际提出来的新的科学问题。本文将提出这方面的初步结果。

2 模式和试验概述

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 $u^* = hu$, $v^* = hv$, $q = (\xi + f)/h$, $K = (u^2 + v^2)/2$, 其余为惯用符号。

2000-12-08 收到, 2001-06-04 收到修改稿

^{*} 国家科学技术部专项项目 2001DIA20026 和国家自然科学基金资助项目 49775263、40075012 共同资助

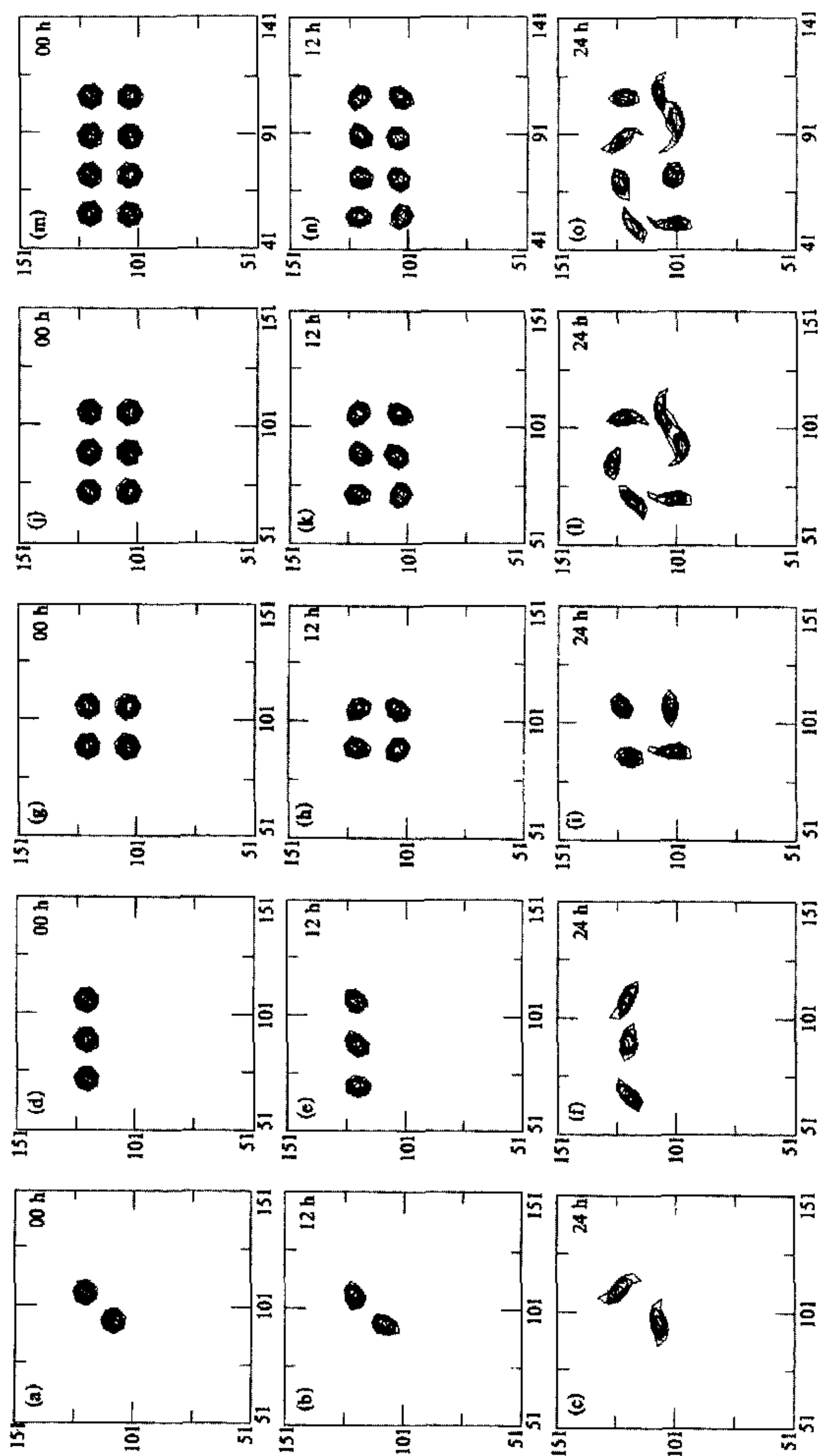


图1 试验 $A_1 \sim A_5$ 中, 0~24 h 相对涡度随时间的演变

等值线间隔: $1.0 \times 10^{-4} s^{-1}$, 图框数字为格点号, 图框面积代表 $2000 \text{ km} \times 2000 \text{ km}$

(a), (b), (c): 试验 A_1 ; (d), (e), (f): 试验 A_2 ; (g), (h), (i): 试验 A_3 ; (j), (k), (l): 试验 A_4 ; (m), (n), (o): 试验 A_5

在南北边界 $y = 0, D$ 处, 令

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(K + gh) &= 0, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u^*}{\partial x} &= 0,\end{aligned}$$

在东西边界用循环边条件。

初始时刻, 令

$$\begin{aligned}h(x, y, 0) &= h_0 + \sum_{i=1}^N h_i(x, y), \\ h_i(x, y) &= \begin{cases} -h_{i0}[1 - \exp(-a/r_i^b)], & r_i < r^* \\ 0, & r_i \geq r^* \end{cases} \quad (4)\end{aligned}$$

式中, $h_0 = 5\,000\text{ m}$, $N = 2, 3, \dots, 8$ 分别代表初始场上有 2, 3, $\dots$, 8 个涡旋同时存在。 $h_i(x, y)$ 是第 i 个涡旋的初始高度场。 h_{i0} 代表涡旋强度。除另外说明外, $h_{i0} = 200\text{ m}$ 。 $a = r_m^b$, $r_m = 80\text{ km}$, b 为形状参数, 令 $b = 2.0$, $r_i = \sqrt{(x - x_{i0})^2 + (y - y_{i0})^2}$, (x_{i0}, y_{i0}) 为第 i 个涡旋中心的坐标。 r^* 为涡旋半径, 令 $r^* = 160\text{ km}$ 。

初始风场由 (4) 式根据梯度风平衡求得。

计算区域为 $4\,000\text{ km} \times 4\,000\text{ km}$, 计 201×201 个格点 ($i = 1, 2, \dots, 201$, $j = 1, 2, \dots, 201$), $d = \Delta x = \Delta y = 20.0\text{ km}$, 计算区域中心处 $\varphi = 30^\circ\text{N}$ 。

采用 Nitta-Hovermale 动力初始化方案, Arakawa C-grid 方案和 Arakawa-Lamb 守恒格式, 时间步长为 7.5 s 。

本文拟分析三个问题:

问题 A: 双台风涡旋合并的判据在多涡旋存在的条件下是否仍然成立。

问题 B: 涡旋数目相同时, 不同的排列方式对合并现象的影响。

问题 C: 排列方式相同时, 如果其中某个涡旋的强度增强, 对结果的影响。

针对上述三个问题, 设计了三类计 14 个试验。积分时间均在 48 个模式小时以上。各个试验的参数等将在下文叙述。

3 多涡旋相互作用的三种类型

在台风动力学中, 初始时刻两个台风涡旋中心之间距离 d 的大小, 是决定它们能否合并的最重要的条件。其次, 涡旋水平尺度、涡旋的径向风速分布、涡旋结构的对称性以及两个涡旋的相对强度, 对能否合并也有一定影响。Ritchie 和 Holland^[6] 的结果: $d \geq 340\text{ km}$ 时, 两个台风分离。我们用本文模式, $t = 0$ 时, 分别令 $d = 300, 340\text{ km}$, 积分 48 h , 前者合并, 后者分离 (图略), 与文献[6]的结果比较一致。

设计 A 类 5 个试验 ($A_1 \sim A_5$)。试验 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 中, 初始场上分别存在 2, 3, 4, 6, 8 个涡旋, 相邻涡旋中心的距离均为 340 km (见图 1a, d, g, j, m)。

在双涡旋的情况下, 涡旋将分离。我们将分析这个判据在 3 个以上涡旋同时存在的场合, 是否继续成立。

由图 1 可见:

(1) 试验 A_1 中, 初始时刻 2 个涡旋中心之间距离 d 为 340 km (图 1a), 以后涡旋逐渐拉长 (图 1b, c)。24 h 时, $d=420$ km, 表明 2 个涡旋分离了。

(2) 在 3 个 (试验 A_2 , 图 1d~f) 和 4 个 (试验 A_3 , 图 1g~i) 涡旋同时存在的场合, 在 0~24 h 期间, 未发生涡旋合并现象。

(3) 在 6 个 (试验 A_4 , 图 1j~l) 和 8 个 (试验 A_5 , 图 1m~o) 涡旋同时存在的场合, 在 24 h, 均发生了涡旋合并现象。

试验 A_1 中, 在 24~48 h 期间, 两个涡旋继续分离 (图略)。试验 A_2 中, 24 h 时, 中间的涡旋与东面的涡旋比较接近 (见图 1f)。28 h 时, 中间的涡旋与东面的涡旋合并, 但是, 随后两者又分裂开来。36 h 时, 中间的涡旋位于西、东涡旋的正中。然后, 中间的涡旋又转而向西, 与西面的涡旋比较接近 (见图 2)。

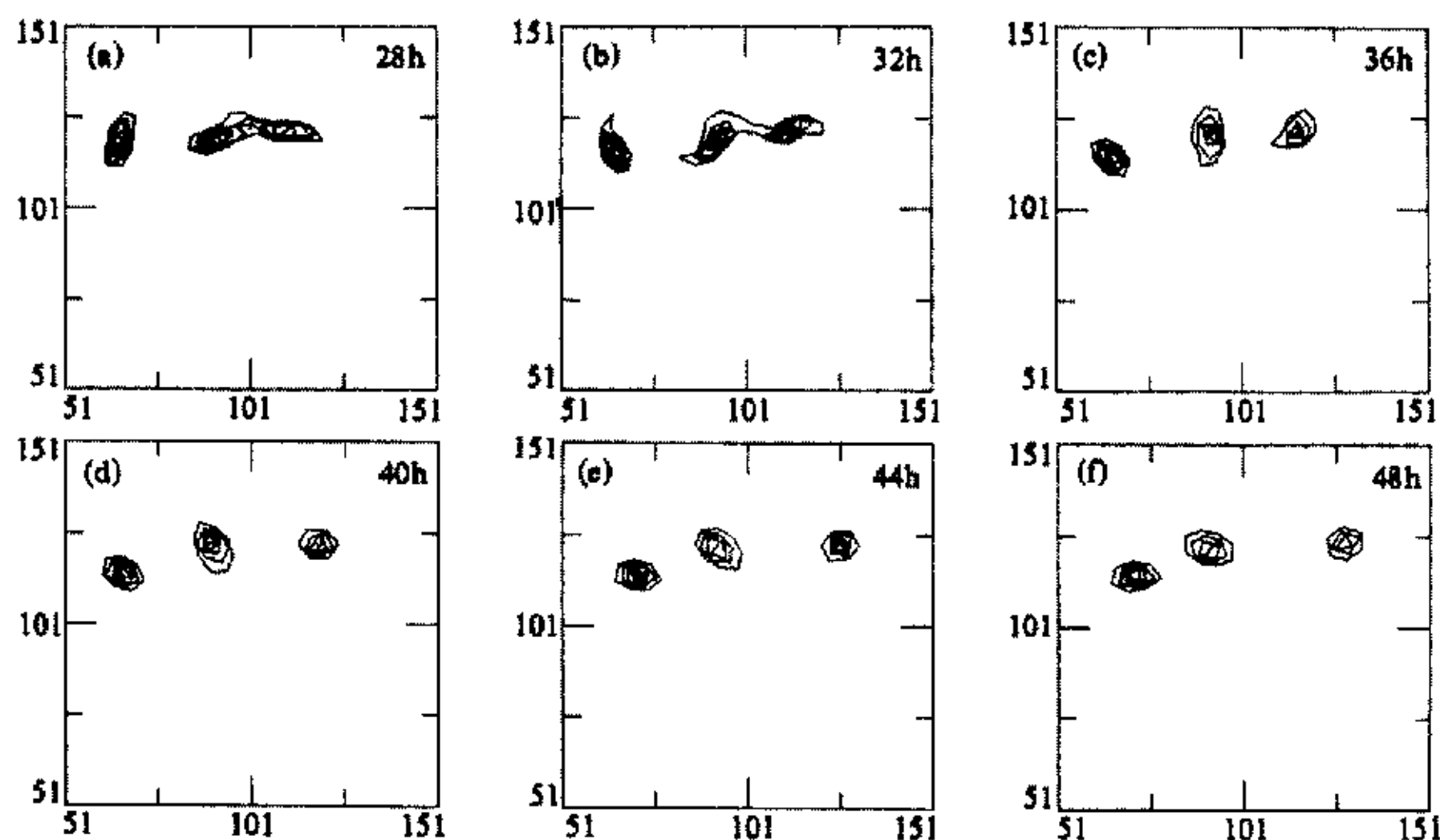
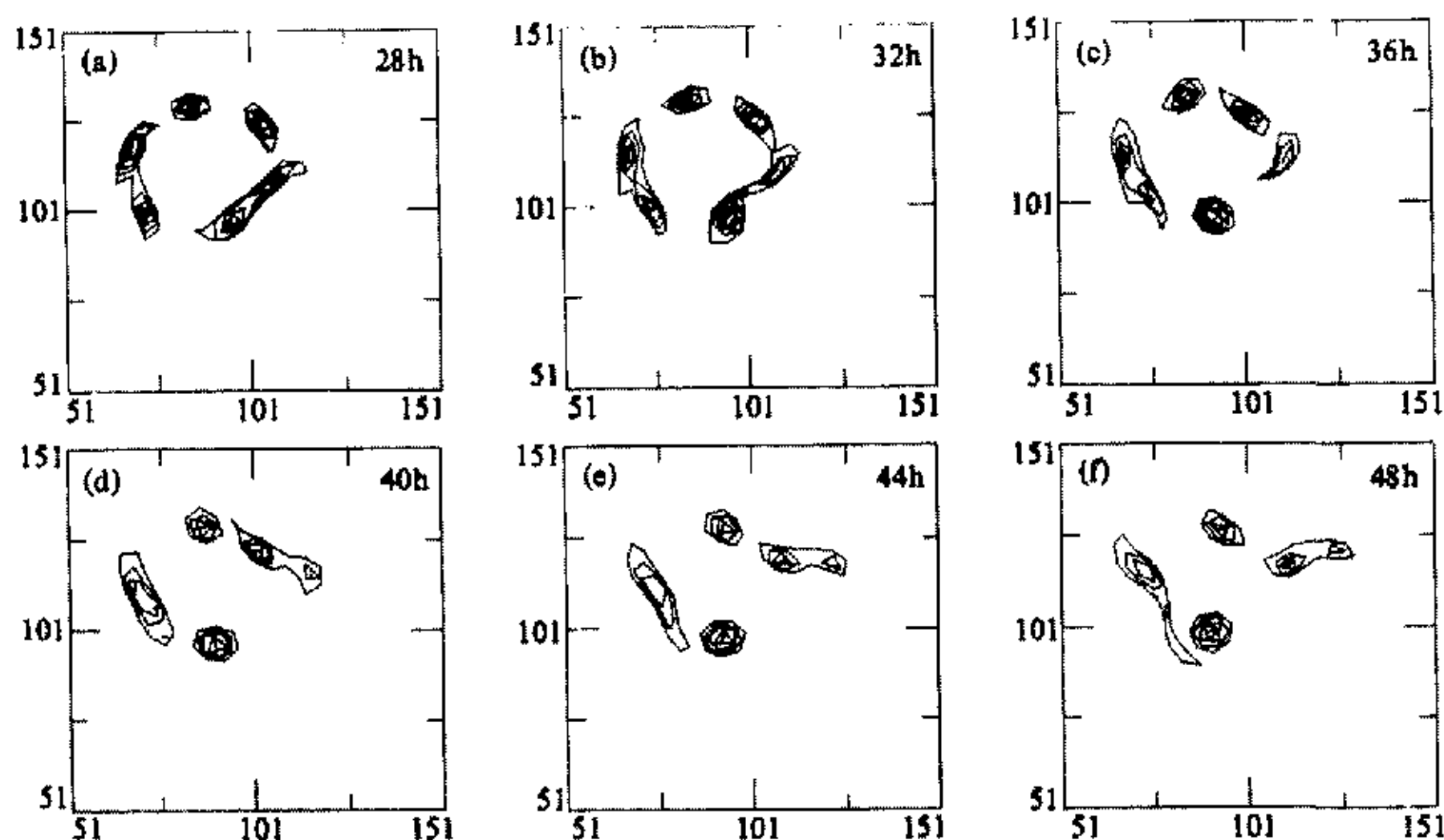
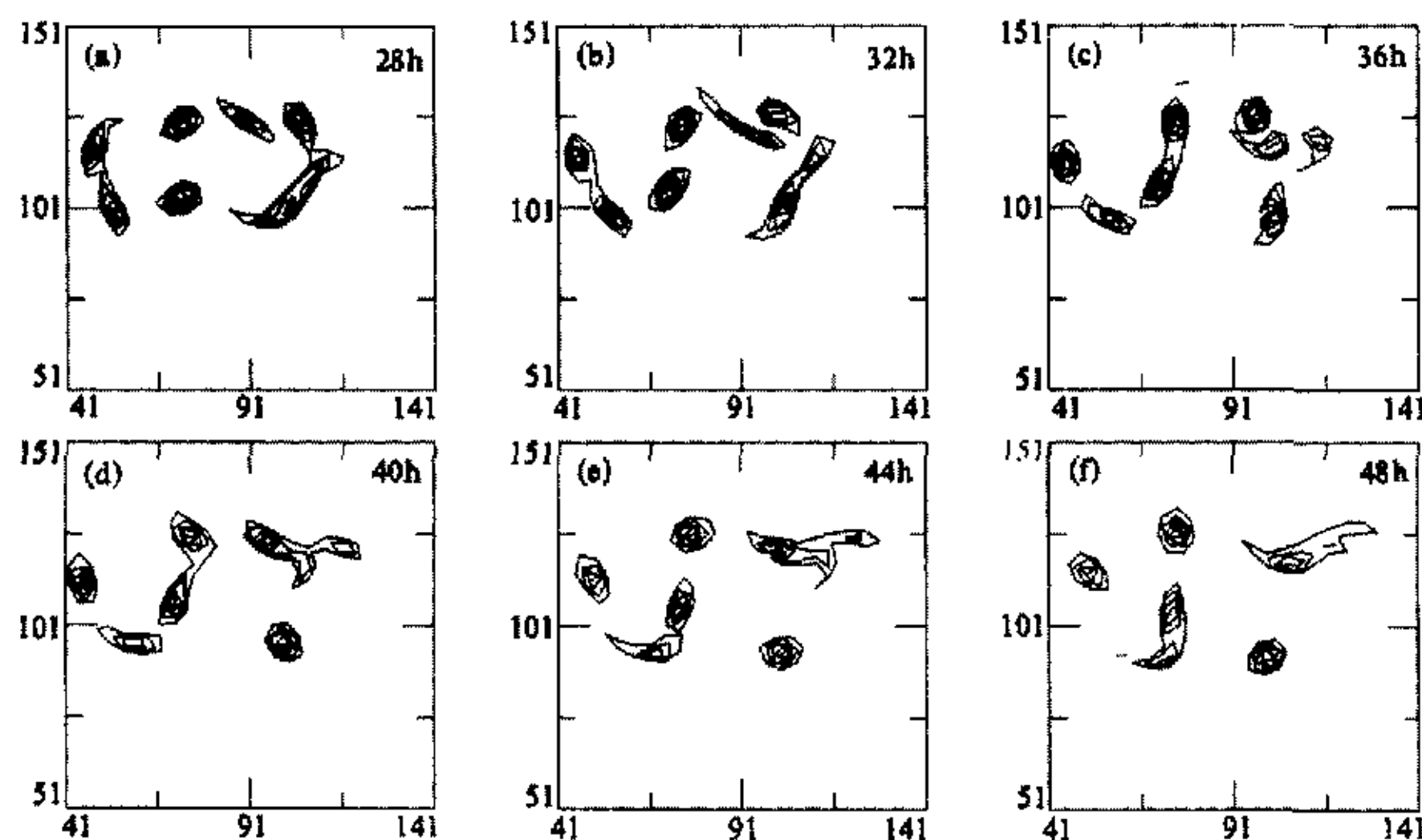


图 2 试验 A_2 中, 24~48 h 期间相对湿度的分布 (说明同图 1)

试验 A_3 中, 24~48 h 期间, 始终保持着 4 个独立的涡旋, 没有任何合并的现象 (图略)。

试验 A_4 、 A_5 中, 在 24~48 h 期间, 涡旋合并的过程继续进行。初始时刻的 6 个和 8 个涡旋, 分别合并为 4 个和 5 个涡旋 (图 3、图 4)。

综上所述, 多涡旋相互作用可能存在三种类型。第一, 与双涡旋相互作用并无区别, 双涡合并和分离的判据继续成立 (试验 A_3 , 初始 4 个涡旋, 图 1g~i)。第二, 除了一个短暂时段外, 双涡合并和分离的判据基本成立; 同时出现了若干新的特征, 如中间的涡旋可以沿东西方向来回摆动 (试验 A_2 , 初始 3 个涡旋, 图 1d~f, 图 2)。第三, 与双涡旋相互作用的情况明显不同, 双涡合并和分离的判据不再成立 (试验 A_4 , 6 个涡旋, 图 1j, 图 3; 试验 A_5 , 8 个涡旋, 图 1o, 图 4)。

图3 试验 A_4 中, 24~48 h 相对涡度的分布 (说明同图1)图4 试验 A_5 中, 24~48 h 相对涡度的分布 (说明同图1)

4 多涡旋排列方式的作用

上面分别讨论了2、3、4、6、8个涡旋的相互作用。现继续分析涡旋排列方式的影响。为此, 实施了B类5个试验 ($B_1 \sim B_5$)。试验 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 初始时刻相对涡度的分布见图5a、d、g、j、m。可见这5组试验中, 初始涡旋数相同, 但排列方式不同。

试验 B_1 的初始场上计有4个涡旋 (图5a), 自左至右分别记为涡旋1、2、3、4。

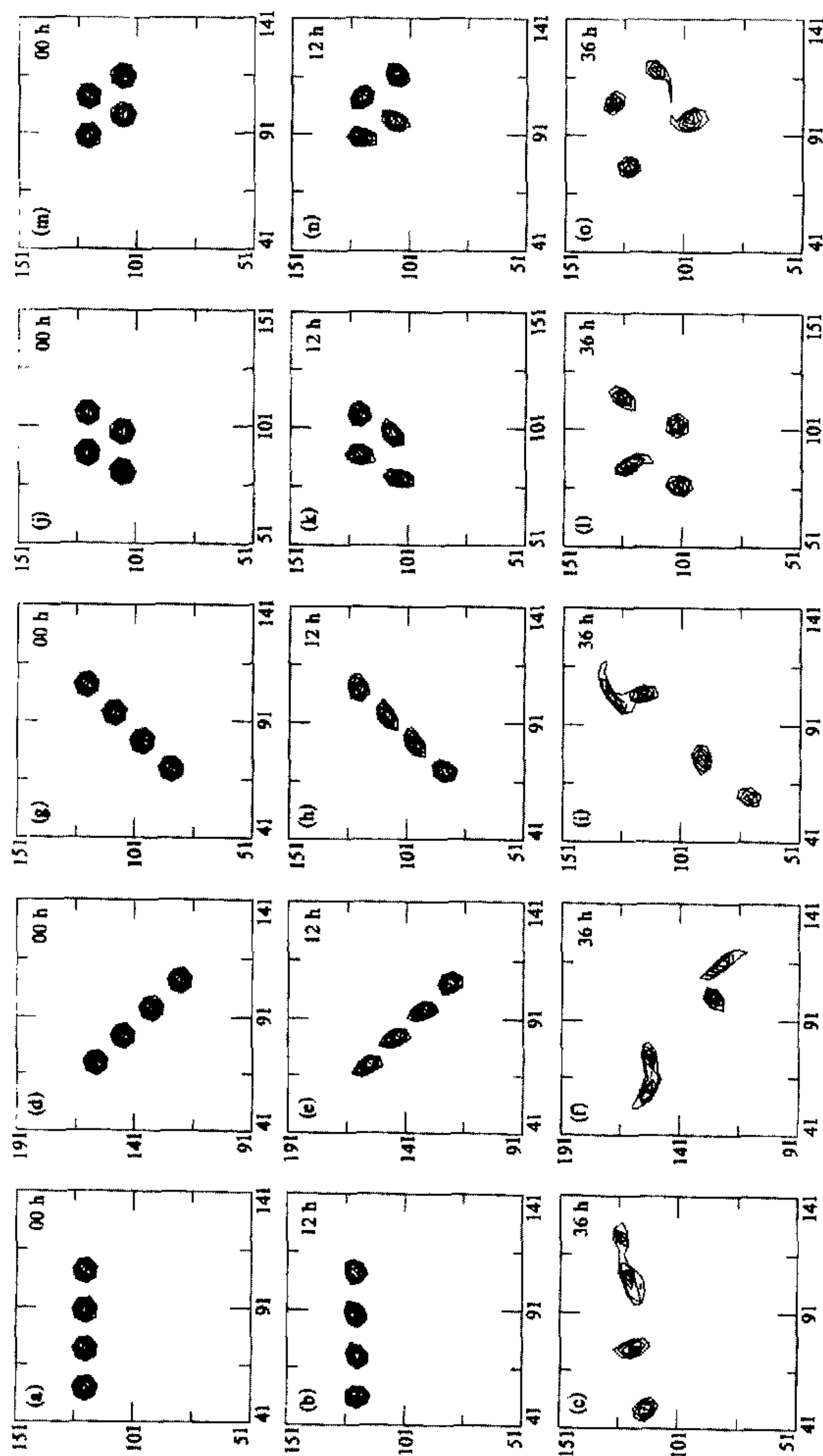


图5 试验 $B_1 \sim B_5$ 中, 0~36 h 相对湿度随时间的演变 (说明同图1)
 (a)、(b)、(c) 试验 B_1 ; (d)、(e)、(f) 试验 B_2 ; (g)、(h)、(i) 试验 B_3 ;
 (j)、(k)、(l) 试验 B_4 ; (m)、(n)、(o) 试验 B_5 .

涡旋 2、3、4 的位置与试验 A_2 初始场上三个涡旋的位置相同 (图 1d)。36 h 时, 涡旋 3 也向东面的涡旋靠近, 有合并的趋势。

试验 B_2 、 B_3 的初始场上, 4 个涡旋分别呈 NW-SE 和 NE-SW 走向 (图 5d、g)。36 h 时, 均显示出涡旋合并现象 (图 5f、i)。

试验 B_4 、 B_5 在 0~36 h 期间, 没有任何涡旋合并现象发生。

所以, 尽管涡旋数目相同, 只要排列方式不同, 对是否合并也会产生影响。

5 不同强度多涡旋的相互作用

以上 A 类、B 类试验归于相同强度多涡旋的相互作用, 即每个试验中, 初始涡旋的强度彼此相等。实际大气中如有多个涡旋同时存在, 一般涡旋强度不会个个相等。因此, 需要分析不同强度多涡旋的相互作用。

为此, 实施了 C 类 4 个试验 ($C_1 \sim C_4$)。这 4 个试验的初始场上, 涡旋数目和排列方式都与试验 A_3 (图 1g) 相同, 4 个涡旋中心位于正方形的四个角上。试验 A_3 中, 4 个涡旋强度相同。C 类 4 个试验中, 4 个涡旋中有一个强涡旋, 强度为其余涡旋的 2.0 倍, 其余 3 个涡旋强度相同。在试验 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 中, 强涡旋分别位于正方形的西北、东北、西南和东南角 (见图 6a、e、i、m)。

C 类 4 个试验的结果表明: 第一, 在相同强度的条件下, 4 个涡旋的相互作用过程中, 并无任何合并现象 (图 1g、h、i); 在不同强度的条件下, 可以导致涡旋合并 (如图 6d)。第二, 初始时刻强涡旋所处的位置不同, 随后的演变情况可以明显不同。试验 C_1 强涡旋位于西北角, 试验 C_2 强涡旋位于东北角, 前者合并现象十分清楚 (图 6a~d), 后者并无合并现象 (图 6e~h); 试验 C_3 、 C_4 强涡旋分别位于西南角和东南角, 两者的差异也十分显著 (图 6i~l, 图 6m~p)。

因此, 分析多涡旋相互作用引起的合并现象时, 可能需要全面考虑涡旋的数目、涡旋的排列方式以及涡旋强度的分布。

6 结果和讨论

当台风 A 在西太平洋区域自东向西移动时, 若在其东面合适的距离内又有一个台风 B 生成, 由于双台风 A、B 之间的相互作用, 往往使台风 A 的移动路径复杂化、异常化, 给路径预测带来困难, 甚至导致预测失败。这就需要深入分析双台风涡旋相互作用的动力学。这是台风异常路径预测和防灾减灾提出来的一个科学问题。这方面已取得一系列的结果。

1998 年 7 月 20 日~22 日长江流域特大洪涝期间, 2~3 个强降雨团在武汉市附近合并, 形成武汉强暴雨中心; 2 个强降雨团在黄石市附近合并, 形成黄石强暴雨中心。与雨团合并相应, 这次特大暴雨过程计有 8 个云团活动, 伴随有云团合并现象。而云团与数值模式中的正涡度涡旋对应很好^[1,2]。看来, 多个强降雨团或多个涡旋的合并现象, 也会给短期降水预测增加难度。这就需要深入分析多涡旋同时存在时, 涡旋合并的动力学。这也是预测业务和防灾实际提出来的一个科学问题。对此, 目前尚少见研究结果发表。

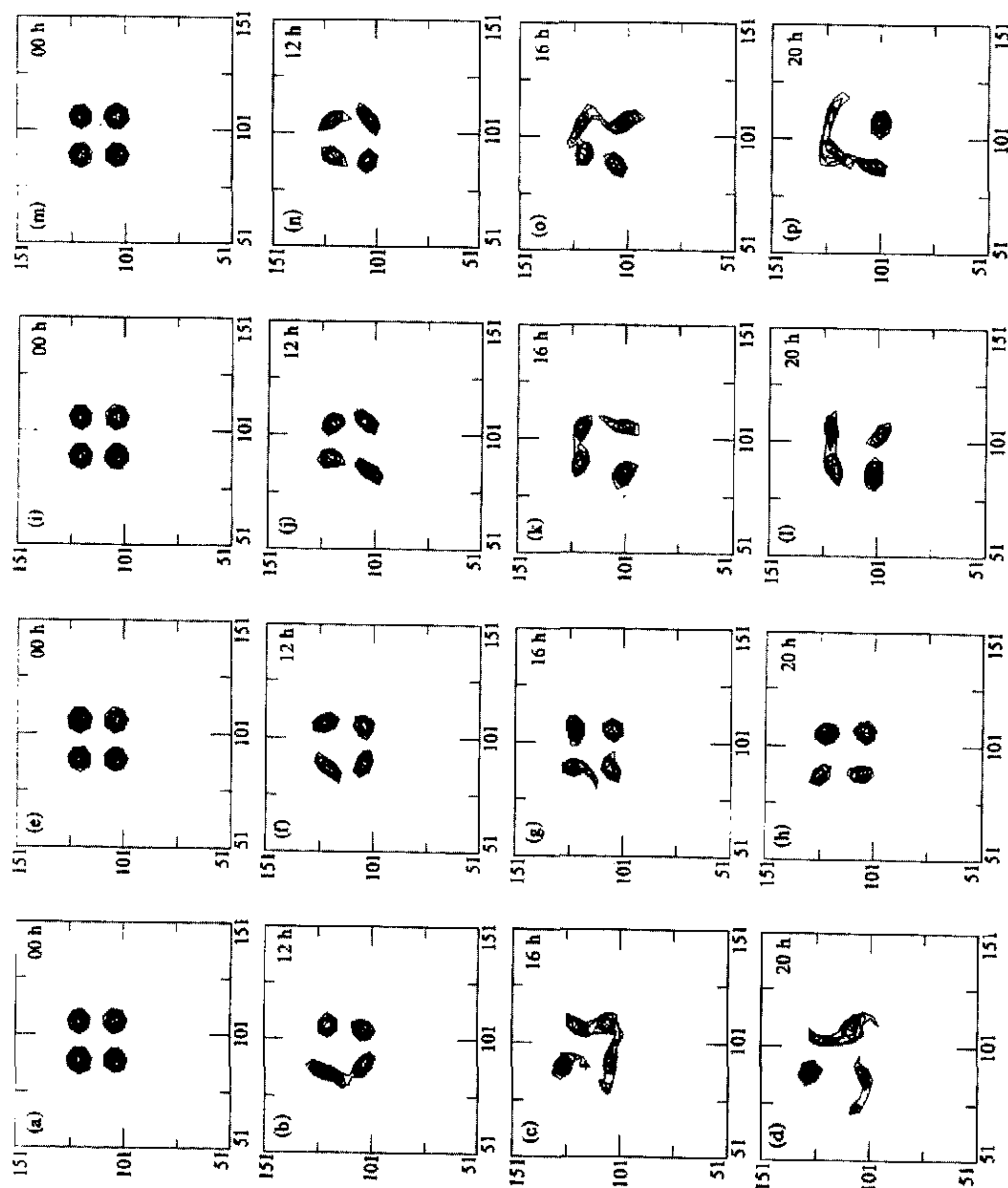


图6 试验C₁~C₄中, 0~20 h相对涡度随时间的演变(说明见图1)

(a)、(b)、(c)、(d) 试验C₁; (e)、(f)、(g)、(h) 试验C₂;
(i)、(j)、(k)、(l) 试验C₃; (m)、(n)、(o)、(p) 试验C₄

本文提出了这方面的初步结果。多涡旋的相互作用可能存在三种类型。第一类, 与双涡相互作用的情况相同, 双涡合并与分离的临界距离判据仍然存在。第二类, 与双涡相互作用的情况基本相同, 但瞬变特征有出入。第三类, 与双涡相互作用的情况完全不同。在双涡相互作用的情况下, 决定涡旋是否合并的最重要的因子是双涡中心之间的距离。在多涡相互作用的情况下, 除了涡旋之间的距离以外, 还取决于三个因子, 即涡旋的数目、涡旋的排列方式和涡旋强度的分布状况。这些初步结果可供应用方面参考。

正压大气中涡旋排列方式影响涡旋合并的物理原因, 是一个比较复杂的问题。目前我们所知不多。初步考虑, 可能与以下三类过程有关。第一, 科里奥利参数随纬度的变化。由于 β 项的存在, 初始轴对称的单个圆形涡旋必然会演变为非对称涡旋; 这个结构的变化又会影响到涡旋的移动。涡旋排列方式不同, 涡旋所处的纬度可能不同, β 项对涡旋结构和移动的影响可能不同, 进一步导致涡旋之间相互距离的变化并影响到是否合并。为了识别 f 随纬度变化这个物理过程的作用, 我们做了 5 个试验 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 。试验 D_i 与 B_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 的差别是, 前者用了 f 平面假定, f 取值不随纬度变化; 后者 f 取值随纬度而变化。结果表明: 试验 D_4 、 D_5 的情况与 B_4 、 B_5 明显不同。说明在试验 B_4 、 B_5 的参数条件下, f 随纬度变化是影响多涡相互作用的一个可能的物理过程。另一方面, 试验 D_1 、 D_2 、 D_3 的情况与试验 B_1 、 B_2 、 B_3 十分相近 (图略)。这意味着 f 随纬度的变化并非唯一影响因子, 试验 B_1 、 B_2 、 B_3 结果之间的差别, 可能另有原因。第二, 相邻涡旋的引导作用。以 2 个涡旋为例, 一般而言, 涡旋 A (B) 受到涡旋 B (A) 外区风场的引导。涡旋排列方式不同, 涡旋外区风场的方位和速度也不相同, 有时可能会改变涡旋之间的距离。多涡旋共存时引导流会有类似的变化。第三, 对近场和远场涡源的响应。仍以 2 个涡旋为例, 设涡旋 A (B) 被分为 N_A (N_B) 个涡元。在每个涡元内部, 相对涡度取相同值, 这些涡元可视为点涡。再设涡旋 A 中任意一个涡元 K 的中心的坐标为 (x, y) , 涡元 K 以外任意一个涡元中心的坐标为 (x', y') 。由涡动力学可知, 位于 (x', y') 的任一涡元作为一个点源, 将在 (x, y) 处产生一个流, 相应地会产生一个涡量。 $N_A + N_B - 1$ 个涡元对涡元 K 的流会产生一个合成的贡献。据文献[7]所述, 即使是远离涡元 K 的远场涡源, 其合成影响有时也不能忽略。涡旋排列方式改变时, 无论是近场效应还是远场效应, 都有可能受到不同程度的影响, 这种影响有时可能会在终态流型上反映出来。关于第二、第三种可能原因, 目前仅能做定性讨论, 定量的结果需要另行设计试验并进一步分析。

与正压模式相比, 实际大气中, 涡旋合并的过程更为复杂。实际上多涡存在表明大气的斜压性非常强。此外, 每个涡旋都需要充足的能量供应才能维持。这就需要考虑非绝热加热、耗散和斜压性的作用。本文模式只是守恒框架内的正压模式, 这是不够的。我们将逐步完善模式, 继续研究。

参 考 文 献

- 1 邓秋华等, “98·7”鄂东南持续特大暴雨的分析, 暴雨·灾害 (三), 北京: 气象出版社, 1999, 115~124.
- 2 崔春光等, 1998年7月鄂东特大暴雨过程的数值模拟试验, 暴雨·灾害 (三), 北京: 气象出版社, 1999, 89~95.

- 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 (一) 物理机制分析, 大气科学, 1992, 16(5), 573~581.
- 4 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 (二) 数值模拟, 大气科学, 1992, 16(6), 659~668.
- 5 Elsberry, R. L. et al., Global perspectives on tropical cyclones, WMO / TD-No.693, 1995, 106~157.
- 6 Ritchie, E. A., G. J. Holland, On the interaction of tropical-cyclone scale vortices, I: discrete vortex patches, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1994, 119, 1363~1379.
- 7 Greengard, L., V. Rokhlin, A fast algorithm for particle simulations, *J. Comput. Phys.*, 1987, 73, 325~348.

A Preliminary Study of the Merge Process of Vorticity Lumps

Luo Zhexian

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Xu Xiangde and Chen Lianshou

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract A shallow-water equations model is integrated on a beta-plane centered at 30°N to study the dynamics of the merge of vorticity lumps in the case that several lumps happen together. Except the distance between two lumps, there are three kinds of factors: the number of lumps, their arrangements, and the distribution of the intensity, which may decide whether the merge process will occur.

Key words: binary vortices; several vorticity lumps; numerical experiment