

冀春晓, 赵放, 高守亭, 等. 2012. 登陆台风 Matsa (麦莎) 中尺度扰动特征分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 551-563, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11085. Ji Chunxiao, Zhao Fang, Gao Shouting, et al. 2012. Analysis of the characteristics of mesoscale disturbance for landfalling typhoon Matsa [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 551-563.

# 登陆台风 Matsa (麦莎) 中尺度扰动特征分析

冀春晓<sup>1</sup> 赵放<sup>2</sup> 高守亭<sup>3</sup> 刘黎平<sup>4</sup>

1 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017

2 浙江省气象台, 杭州 310017

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘要** 地面中尺度自动站和多普勒雷达资料的分析都表明, 台风 Matsa 登陆后的低层螺旋云带中活跃着中尺度气旋性涡旋系统。本文使用新一代中尺度 WRF 模式对台风 Matsa 登陆后的变化特征进行了数值模拟, 使用四维变分多普勒雷达分析系统 (4D-VDRAS) 对台风 Matsa 多普勒雷达径向风进行了风场反演。在此基础上对台风 Matsa 登陆后中尺度扰动特性进行了初步探讨; 对台风 Matsa 与其螺旋云带的中尺度系统之间动能和涡度的相互转换进行了诊断分析。分析表明: (1) 数值模拟和雷达风场反演结果表明, 登陆台风 Matsa 的低层螺旋云带中活跃着中尺度气旋式涡旋系统, 与之相伴随的为较强的中尺度上升区, 而且, 中尺度垂直上升运动的强弱与雷达对流回波强度成正相关, 中尺度垂直上升运动越强, 雷达对流回波发展越旺盛。(2) 台风 Matsa 与其中尺度系统动能转换的诊断分析说明, 低层中尺度系统从台风 Matsa 环流中获得动能而发展; Matsa 在陆地上长久维持主要是从高层获得动能。(3) 台风 Matsa 与其中尺度系统涡度转换的诊断分析说明, 低层中尺度系统向 Matsa 输送正涡度主要依靠中尺度垂直运动来完成; 高层正涡度的转换通过水平输送和垂直输送共同来完成。所以, 中尺度系统所产生的正涡度源源不断地向 Matsa 输送, 使 Matsa 的气旋性环流可以在陆地上长久维持。

**关键词** 登陆台风 中尺度扰动 维持 动能和涡度转换

**文章编号** 1006-9895 (2012) 03-0551-13

**中图分类号** P444

**文献标识码** A

**doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11085

## Analysis of the Characteristics of Mesoscale Disturbance for Landfalling Typhoon Matsa

Ji Chunxiao<sup>1</sup>, ZHAO Fang<sup>2</sup>, GAO Shouting<sup>3</sup>, and LIU Liping<sup>4</sup>

1 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310017

2 Zhejiang Province Meteorological Observatory, Hangzhou 310017

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract** Doppler radar reflectivity and the surface automatic weather stations (AWS) wind observations demonstrate that the mesoscale cyclonic eddies at the low level are active in the spiral-cloud bands of landfalling typhoon Matsa. Numerical simulation has been carried out to investigate the evolution characteristics of typhoon Matsa in

**收稿日期** 2011-04-29, 2011-09-16 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 90815028, 国家公益性行业(气象)科研专项 GYHY201106035

**作者简介** 冀春晓, 女, 1963 年出生, 硕士, 正研级高级工程师, 研究方向: 中尺度数值预报和雷达资料应用。E-mail: jichunxiao@sina.com

2005 after its landfalling by using the new-generation mesoscale weather research and forecasting (WRF) model, and the four-dimensional variational Doppler radar analysis system (4D-VDRAS) is used to retrieve single-Doppler velocity. Then a preliminary study has been made on the mesoscale features of typhoon Matsa after landfalling in parallel with diagnostic analyses of the conversion of kinetic energy and vorticity between typhoon Matsa and mesoscale systems on the area mean basis. Results show that: (1) The results of numerical simulation and Doppler radial velocity retrieval indicate that the mesoscale cyclonic eddies at the low level are active in the spiral-cloud bands of landfalling typhoon Matsa, and there is severe mesoscale upward movement accompanying the mesoscale cyclonic eddies. The stronger the mesoscale upward movement is, the larger Doppler radar reflectivity is. (2) The diagnostic results of the kinetic energy conversion between Matsa and mesoscale systems demonstrate that the mesoscale cyclonic eddies at the low level obtain kinetic energy from landfalling typhoon Matsa to develop, whilst Matsa obtains kinetic energy from the mesoscale disturbances in the upper layers to be sustained after landfalling. (3) The diagnostic results of the vorticity conversion between Matsa and mesoscale systems show that Matsa obtains positive vorticity from the mesoscale cyclonic eddies at the low levels by means of the mesoscale upward movement, but in the upper layers, both the mesoscale horizontal and vertical movements play important roles. Therefore, the positive cyclonic vorticity is transported continuously to Matsa, and Matsa could be sustained for a long time after landfalling.

**Key words** landfalling typhoon, mesoscale disturbance, maintenance, kinetic energy and vorticity conversion

## 1 引言

随着气候的逐渐变暖, 高温热浪、干旱、强降水等极端气候事件发生的频率增加、强度增大, 造成洪涝、干旱等灾害更为严重。近几年来, 影响我国台风的强度和频率似乎也有增长的趋势。例如, 2007年8~10月期间, “圣帕”、“韦帕”、“罗莎”3个强台风接连严重影响了浙江省, 造成了大范围的暴雨和大暴雨。登陆台风所带来的灾害与其强度、登陆后维持的时间等有着密切的关系。台风强度及强度变化主要受下垫面、环境场的风垂直切变、上层槽和台风涡旋自身结构的影响 (Emanuel, 1988; DeMaria, 1996; Montgomery and Kallenbach, 1997; Jones, 2000)。环境因子通过与涡旋的相互作用影响涡旋内部结构及物理过程, 进而影响台风的强度变化。环境场、台风及涡旋内部多尺度之间的相互作用决定了台风强度变化的复杂性 (Wang and Wu, 2004)。Chen (1998) 指出, 登陆台风在以下几种环流条件下将维持较长时间: (1) 台风环流保持一定的水汽供给; (2) 台风环流中存在活跃的中尺度对流活动; (3) 弱冷空气侵入台风环流引起变性; (4) 登陆台风环流移入一个高空辐散区之下。陈联寿等 (2002) 的研究表明, 登陆台风因地形或环境流场辐合作用常在其外围形成中尺度涡旋, 当这种涡旋与台风相互作用被吸入内区时, 这时台风涡量将增加, 有利于登陆台风在陆上的维

持。李英等 (2005a) 的诊断研究发现, 长久维持的热带气旋在登陆后仍保持一定强度, 并从外界获得热量和水汽补充来支持积云对流发展, 而积云对流对登陆热带气旋的长久维持具有正反馈作用。陈永林等 (2008) 分析麦莎台风次天气尺度系统的非对称性结构时发现, 台风麦莎登陆后其外围云系中活跃着中尺度对流系统。段丽和陈联寿 (2005) 在对热带风暴“菲特”的诊断研究中发现, 当“菲特”穿越琼州海峡时, 其外围流场和五指山山脉的辐合极有利于中尺度对流小涡系统 (MCS) 的生成, 而特大暴雨就出现在 MCS 所在地区。王继志和杨元琴 (1995) 研究了 8807 号台风突然增强的原因后指出, 台风中中尺度系统与周围环境中大尺度系统的相互作用对台风的增强十分重要。而热带气旋的加强则可能与其从次天气尺度运动中获得动能补充有关。李英等 (2004) 在登陆热带气旋维持的次天气尺度环流特征中指出, 台风涡旋的强对流云团或雨带作为次天气尺度呈现出的波状螺旋型特征, 这种螺旋波结构有利于热带气旋的维持。维持和加强的登陆热带气旋可以从次天气尺度环流中获得动能补充, 所以, 判断一个热带气旋登陆后能否继续维持或再加强, 除考虑大尺度环流等因素的影响外, 次天气尺度环流的作用也是一个不可忽视的因子。于玉斌等 (2008) 的数值模拟试验表明低层气旋性涡旋并入台风环流是“桑美”近海急剧增强的重要原因。邓国等 (2005) 对台风数值模拟中边界层方案

进行敏感性试验后发现, 台风边界层通过摩擦混合和辐射等作用与地表产生水汽、热量和动量的交换, 并通过湍流效应和积云的夹卷作用将边界层的影响扩展至整个自由大气。励申申等(1992)的研究表明, 登陆台风的消亡除摩擦作用外, 还可能通过支持外围大暴雨的发展将能量传递出去而使本身消亡。袁金南等(2005)发现, 边界层摩擦对登陆热带气旋强度的影响非常明显, 其中摩擦是造成登陆热带气旋强度迅速减弱的一个重要因素。李英等(2005b)的研究表明, 外界水汽输送有助于热带气旋雨带中的强对流活动, 使雨量加强。而对流活动过程中水汽凝结潜热释放是热带气旋获得能量继续维持的重要条件。于玉斌等(2008)在超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强特征及机理分析中指出, “桑美”台风急剧增强过程中, 对流层高层动能的下传是对流层低层动能补充的重要途径之一。这些研究均表明, 登陆台风强度的变化与中尺度系统活动存在着非常密切的关系。

另外, 随着科学技术的进步, 新一代多普勒天气雷达在对台风等灾害天气的探测中发挥了越来越重要的作用。多普勒天气雷达不仅能够探测台风的螺旋云带, 而且通过风场反演技术有可能得到台风中高时空分辨率的风场结构, 这对于研究其中系统的动力结构大有益处。Sun et al. (1991)、Sun and Crook (1994, 1997, 1998) 利用四维变分方法, 结合云模式及其伴随模式, 提出了多普勒雷达 4DVAR 同化反演方法, 试验表明该方法能够反演风暴云团的热、动力场和微物理场。随着变分技术的引入, 使风场反演的可靠性和精度得到了进一步提高, 深化了对台风、飑线等灾害性天气的认识 (Wu et al., 2000)。周海光和王玉彬(2005)使用双多普勒雷达三维风场反演技术 (MUSCAT) 对 6 月 29~30 日合肥和马鞍山多普勒雷达探测到的暴雨资料进行了三维风场反演, 对暴雨系统的中尺度三维动力结构进行了研究, 给出了此次暴雨的三维动力结构。王俊等(2011)双多普勒雷达反演的三维风场分析表明, 普通多单体雷暴中低层存在水平辐合风场, 且雷暴的发展与水平辐合风场的强度成正比。孙建华等(2006)的多普勒反演风场分析表明, 造成滁州强降雨的系统中存在中尺度辐合线, 且中尺度辐合线只出现对流层低层, 辐合线随高度向北倾斜。但利用多普勒雷达探测资料研究台风系

统中的中尺度系统三维动力结构的国内还不多见。

2005 年 9 号台风 Matsa 登陆后在陆地上持续维持了近 75 小时, 沿途带来较大的灾害, 造成了巨大的损失。关于 Matsa 登陆后持续维持的机理冀春晓等(2007)已经作过分析。本文着重分析研究台风 Matsa 登陆后维持期间其螺旋云带中的中尺度扰动特性。利用多普勒雷达探测到的 Matsa 台风资料进行了四维变分风场反演, 探讨了台风 Matsa 登陆后维持期间的中尺度结构, 从而进一步深化对登陆台风中尺度三维动力结构演变特征的认识。

## 2 模式、雷达同化和个例模拟

### 2.1 模式简介

本文使用美国 NCAR 等研制开发的新一代中尺度数值模式 WRF (V2.1), 网格格距为 15 km, 模式区域中心点为 (29.3°N, 120.1°E), 格点数为 363×363, 垂直方向 31 层  $\sigma$  坐标。微物理过程选取 Lin 等(1983)的方案; 陆面过程选取 Noah (Chen and Dudhia, 2001) 方案, 积云对流参数化方案选取 Betts-Miller-Janjic (Janjić, 1994, 2000) 方案。初始时间选取 2005 年 8 月 6 日 00 时 (协调世界时, 下同), 积分时间为 72 小时, 初猜场和边界值选用 NCEP 的 1°×1°再分析资料, 常规资料为气象信息综合分析处理系统 (MICAPS) 地面和高空资料, 采用 3DVAR 技术将初始时刻的地面、高空观测资料同化进入模式。侧边界为 6 小时变边界。对台风未经任何人工处理。

### 2.2 雷达 4DVAR 同化反演系统简介

本文使用中国气象局气象科学研究院灾害天气国家重点实验室提供的 4DVAR 同化反演系统。同化模式和变分同化方法由 Sun and Crook (1997) 建立, 这里仅对其作一简要介绍。同化模式为一个三维云模式, 云模式建立在笛卡儿坐标系中, 采用滞弹性近似, 包含 6 个预报方程, 它们是 3 个动量方程、热力方程、雨水方程和总水方程。数值模式以无量纲变量形式编程, 这样可以平衡不同变量量级的差异, 使得在同化过程中每个变量有相似的权重从而得到更好的收敛率。4DVAR 资料同化的基本思想就是找模式变量的最优初始场, 使得模式输出结果在一定的时域和空域上与相应的观测结果尽可能接近。为此, 单部雷达价值函数  $J$  为

$$J = J_b + \sum_{\sigma, \tau} [\eta_v (V_r - V_r^{\text{ob}})^2 + \eta_z (Z - Z^{\text{ob}})^2] + J_p,$$

其中, 求和针对空间区域  $\sigma$ 、同化窗  $\tau$  而言,  $\eta_v$  和  $\eta_z$  分别是径向速度和反射率的权重系数,  $V_r^{\text{ob}}$  和  $Z^{\text{ob}}$  是雷达观测的径向速度和反射率。  $V_r$  和  $Z$  表示模式输出的径向速度和反射率。  $J_b$  和  $J_p$  分别为背景场、补偿项函数。具体算法见 Sun and Crook (1997), 在此不再赘述。

### 2.3 个例选择

2005 年第 9 号台风 Matsa 于 8 月 5 日 19:40 时在浙江省玉环县干江镇沿海登陆, 登陆时中心气压 950 hPa, 近中心最大风速 12 级以上 (45 m/s)。登陆后先向西北方向移动, 之后 Matsa 一路北上, 强度减弱缓慢, 给所经之地造成了重大的灾害。所以, 探讨台风 Matsa 在登陆后强度继续维持的中尺度系统特征, 对业务天气预报应该具有十分重要的指导意义。

### 2.4 台风强度与路径的数值模拟

台风 Matsa 登陆后, 在陆地上持续维持了近 75 小时, 基本上可分为两个阶段, 第一阶段为 5 日 18 时~6 日 18 时, 台风中心迅速被填塞, 中心气压从 950 hPa 快速上升到 985 hPa, 近中心风速从 45 m/s 快速下降到 28 m/s, 但强度仍保持较强; 第二阶段为 6 日 18 时~8 日 21 时, 这一阶段里台风强度变化很小, 之后 Matsa 减弱为温带气旋。从图 1a 可以看到, 模式模拟的台风中心气压在开始的几个小时里与实际观测值相差比较大, 主要原因可能是由于所采用的 NCEP 资料水平分辨率还不够高, 对台风的强度达不到更精确的描述, 以及模式自身的 spin up 等问题, 导致模拟的台风中心气压要明显高于实际值。随着时间的延续, 两者很快变得一致, 模式对 Matsa 强度缓慢变化过程进行了成功的模拟。从图 1b 可以看到, 模式对台风 Mat-

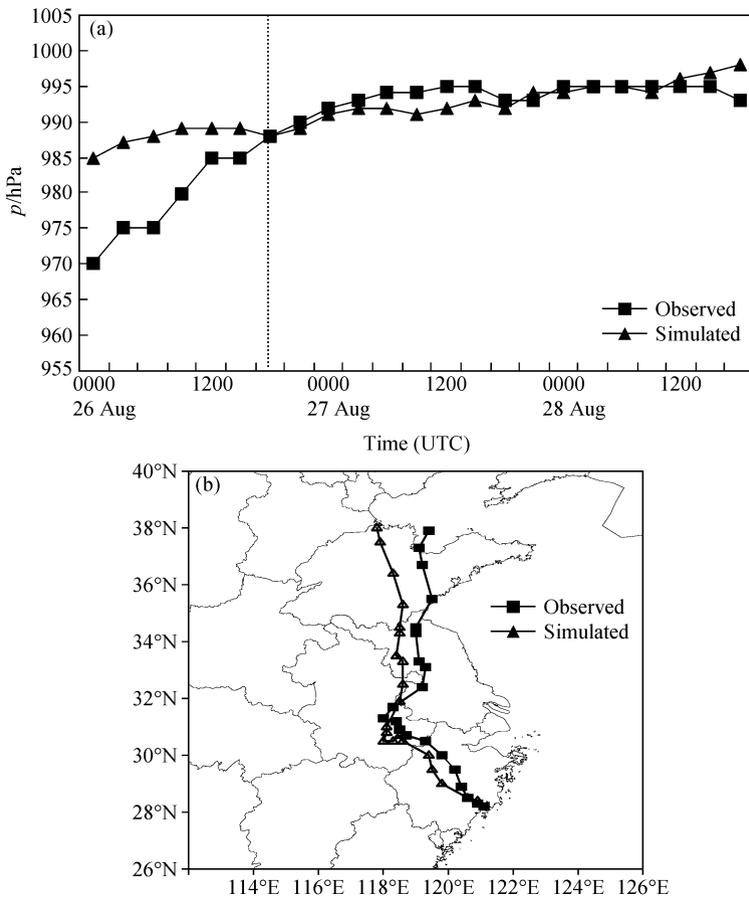


图 1 (a) 台风中心气压随时间演变图 [竖虚线为两个阶段的分界线 (下同)]; (b) 台风路径图

Fig. 1 (a) Temporal evolution of the observed (■) and simulated (▲) sea level pressure (hPa) at the center of typhoon Matsa (The vertical dashed line denotes the dividing point between the two different periods of typhoon and tropical storm, the same below); (b) the track of typhoon Matsa

sa 登陆后路径的模拟也是比较接近实况的, 其中包括 Matsa 登陆后先向西北方向移动, 而后转向偏北方向移动。但是, 随着模拟时间的延长, 模拟 Matsa 路径与实况的误差增大, 这可能是由于模式模拟准确度与模拟时间成反比的缘故。

### 3 中尺度扰动场特征分析

#### 3.1 地面中尺度自动站与雷达观测事实

我国地面中尺度自动站与多普勒雷达的布网为我们分析中尺度对流系统提供了宝贵的观测资料。图 2 给出了不同时间、不同区域的地面风向风速实

测分布图。图 2a 为 2005 年 8 月 6 日 15 时地面中尺度自动站 2 分钟的风向风速分布图, 图中数字表示风速值, 此时 Matsa 中心位置位于 (30.5°N, 119.3°E)。从图 2a 可以看到 Matsa 的气旋式环流很明显, 强风速区位于 Matsa 中心的东北方。将图 2a 中黑方框区域放大后 (图 3a) 可以发现, 在 Matsa 的气旋式环流中, 即在浙江省的台州地区存在中尺度气旋性辐合区, 辐合中心 (图 3a 中▲, 下同) 的极小值达到了  $-3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  左右。在 6 日 15:01 时温州多普勒雷达组合反射率图 (图 3a) 上可以看到, 中尺度气旋性辐合区域中存在着结构密

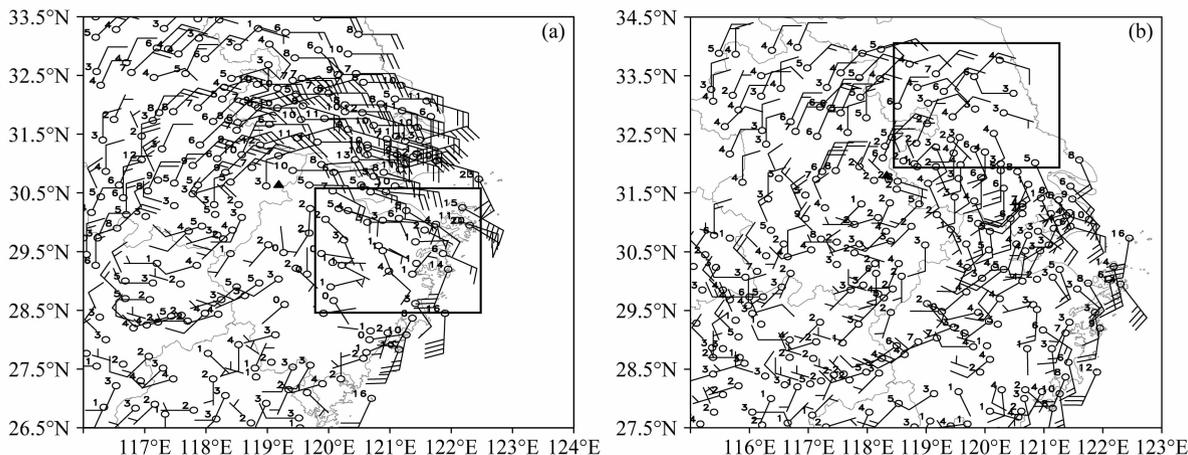


图 2 2005 年 8 月 (a) 6 日 15:00 时和 (b) 7 日 06:00 时不同区域地面中尺度自动站 2 分钟平均风向风速图 (单位: m/s, 数字为风速) ▲: 地面辐合中心 (下同)

Fig. 2 Observed 2-minute-mean surface winds (m/s) from AWS for different time and areas; (a) At 1500 UTC 6 Aug 2005; (b) at 0600 UTC 7 Aug 2005. ▲: the position of convergence center (the same below)

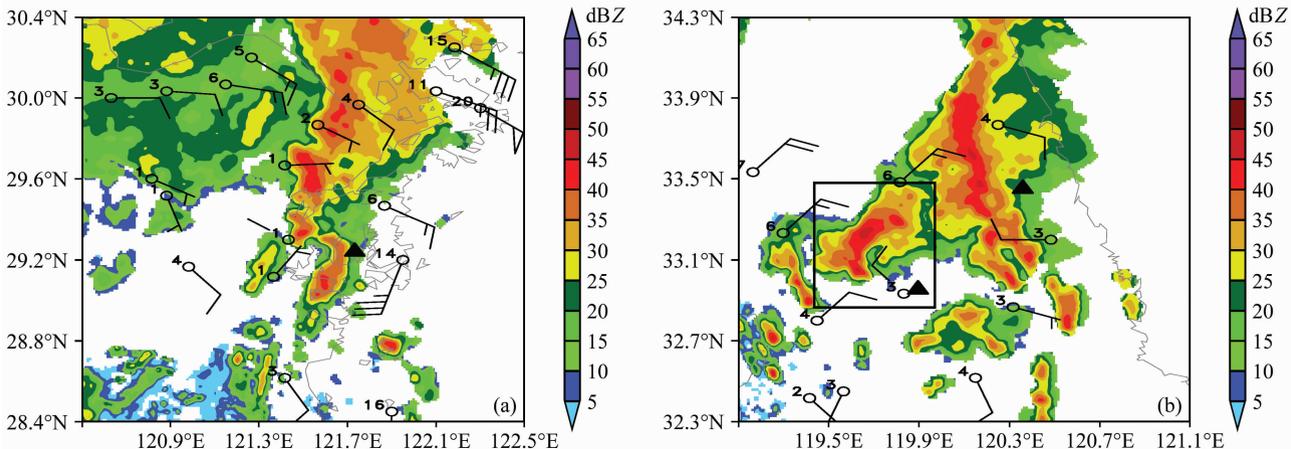


图 3 2005 年 8 月不同时间和不同地点雷达组合反射率 (单位: dBZ) 和地面中尺度自动站 2 分钟平均风向风速图 (单位: m/s): (a) 6 日 15:01 时温州雷达; (b) 7 日 06:01 时南京雷达

Fig. 3 Composite reflectivity of Doppler radar and observed 2-minute-mean surface winds from AWS for deferent time and areas; (a) Wenzhou radar at 1501 UTC 6 Aug 2005; (b) Nanjing radar at 0601 UTC 7 Aug 2005

实的强对流回波, 30 dBZ 以上的强回波呈带状分布, 最强回波达 45 dBZ 左右, 25 dBZ 回波顶高达 500 hPa 左右 (图 5a), 但辐合中心与强回波中心并不重合。2005 年 8 月 7 日 06 时 (图 2b) 台风 Matsa 的中心位置已经到达了 118.3°E、31.7°N, 虽然仍维持着气旋式环流, 但其强度明显减弱。与前一时刻相同的是如图 3b (图 2b 中黑方框区域) 所示, 在 Matsa 的气旋式环流中仍然存在着中尺度气旋性辐合区, 但辐合强度比 6 日 15 时要有所减弱, 中心的最小值为  $-2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  左右。相应地在 7 日 06:01 时南京的多普勒雷达组合反射率图 (图 3b) 上, 存在发展旺盛的对流回波与地面中尺度气旋性辐合区域相对应, 同样辐合中心与强回波中心不重合, 这些对流回波的组合反射率最大值均达到了 50 dBZ 左右, 而 25 dBZ 回波顶高达 350 hPa 左右 (图 5b), 与前一时刻相比, 中尺度对流回波的发展更加旺盛, 可见这些中尺度对流回波

都是比较深厚的对流系统。以上观测事实均说明 Matsa 螺旋云带中存在着比较深厚的中尺度对流系统。

### 3.2 中尺度扰动场特征的数值模拟分析

为了分析中尺度扰动场, 滤波方案采用 GrADS 九点平滑算子, 对积分流场进行尺度分离, 得到中尺度扰动场。与观测事实相一致, 本文给出了 6 日 15 时和 7 日 06 时两个时刻相应区域的模拟结果。图 4 为 Matsa 在这两个时刻、950 hPa 和 700 hPa 经过滤波后的中尺度扰动流场。分析图 4 可知, 无论 Matsa 在第一阶段还是第二阶段, 低层 950 hPa 上 (图 4a、c) Matsa 螺旋云带中都活跃着中尺度气旋式涡旋系统。处于第一阶段时, 低层 950 hPa 上 (图 4a) Matsa 螺旋云带的中尺度气旋式涡旋的位置与地面中尺度自动站 (图 3a) 观测到的中尺度辐合中心基本吻合; 到第二阶段时, Matsa 螺旋云带的中尺度气旋式涡旋的位置 (图 4b) 与

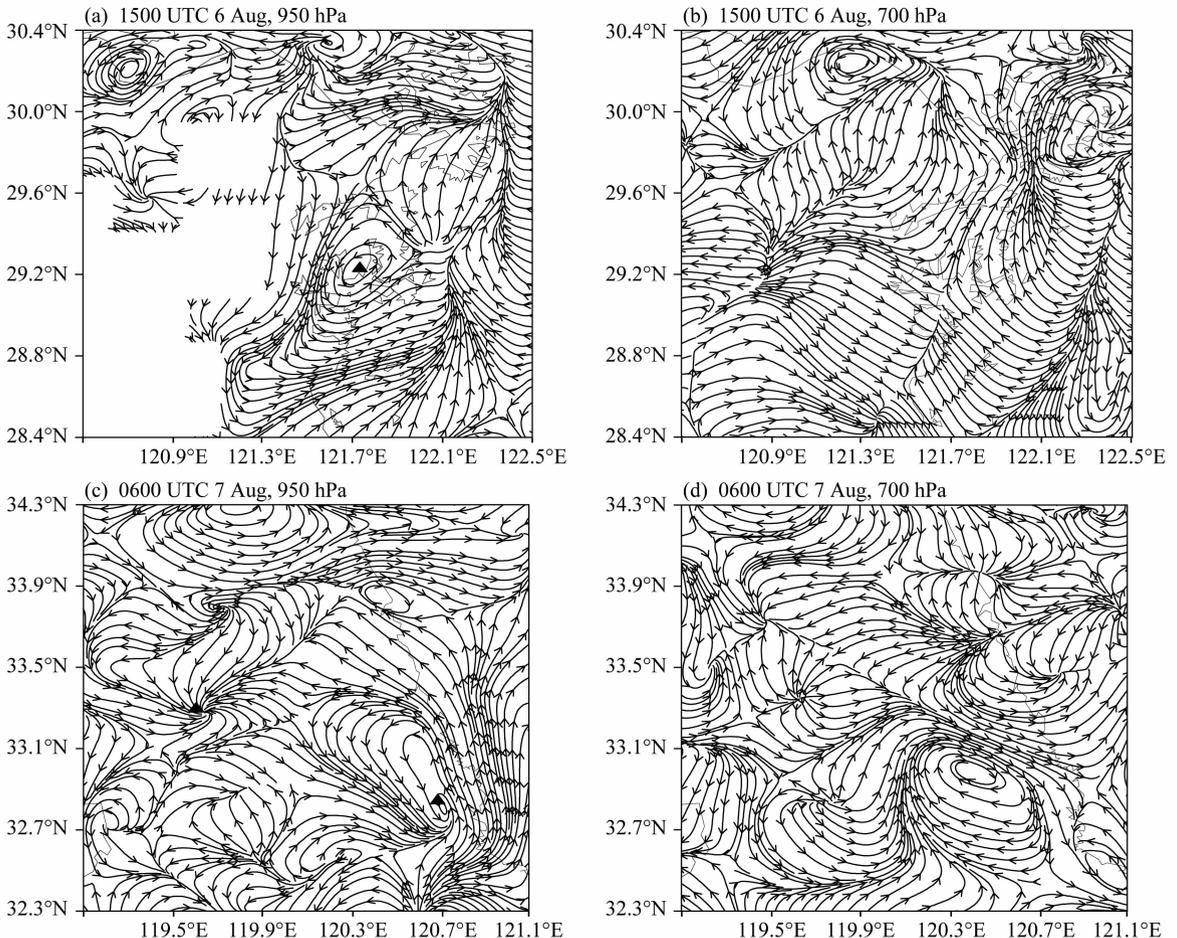


图 4 2005 年 8 月 6 日 15:00 时 (a、b) 和 7 日 06:00 时 (c、d) 950 hPa (a、c) 和 700 hPa (b、d) 中尺度水平流场

Fig. 4 Mesoscale streamline fields at (a, c) 950 hPa and (b, d) 700 hPa at (a, b) 1500 UTC 6 Aug 2005 and (c, d) 0600 UTC 7 Aug 2005

地面中尺度自动站(图 3b)观测到的中尺度辐合中心存在明细的偏离。随着高度的增加,中尺度气旋式涡旋逐渐转变减弱,到 700 hPa 高度(图 4b、d),中尺度气旋式涡旋系统已经消失并转变为辐散区,说明中尺度气旋式涡旋系统只在低层存在。

图 5 给出了沿中尺度气旋式涡旋中心(图 4 中▲)的垂直剖面图,阴影区为对应时刻的雷达基本反射率。图 5a 为 6 日 15 时沿(29.2°N, 121.7°E)中尺度气旋式涡旋中心的纬向垂直剖面图,从图 5a 可以看到,在中尺度气旋式涡旋中心的上空,存在明显的中尺度垂直上升区,中尺度垂直上升速度的极大值位于 750 hPa 附近,量值为  $0.6 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ 。与实际雷达回波相比较可知,低层的上升运动区对应着较强的雷达对流回波,对流回波的极大值约 35 dBZ, 25 dBZ 回波顶高达到 650 hPa 左右,但最强的雷达回波与上升运动中心不重合。在沿(29.2°N, 121.7°E)中尺度气旋式涡旋中心的经向垂直剖面图(图略)上,中尺度气旋式涡旋中心上空同样存在上升运动,上升速度的极大值(700 hPa 附近)出现在涡旋中心的南侧,与较强的雷达对流回波存在偏离。图 5b 为 7 日 06 时沿位于(33.3°N, 119.7°E)中尺度气旋式涡旋中心的经向垂直剖面图,同样,中尺度气旋式涡旋中心的上空为明显的中尺度垂直上升区,中尺度垂直上升速度的极大值中心位于 700 hPa 附近,为  $4 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ 。相应的对流回波极大值约 40 dBZ, 25 dBZ 回波顶高达到 400 hPa 左右,上升区的两侧为下沉运动区,同样最强的雷达回波位于上升运动中心的南侧。从(33.3°N, 119.7°E)中尺度气旋式涡旋中心的纬向垂直剖面图(图略)上可知,中尺度气旋式涡旋中心上空同样存在上升运动,但上升速度的极大值(750 hPa 附近)出现在涡旋中心的西侧,同样与较强的雷达对流回波存在偏离。以上结果说明,最强的雷达回波与最强的中尺度上升运动中心是不重合的。对比图 5a 和图 5b 可以发现,7 日 06 时中尺度扰动、对流回波极大值都比 6 日 15 时的要强很多,最强的雷达回波与中尺度上升运动中心并不完全重合,这一点在雷达风场反演结果中也得到了证实。以上分析结果说明中尺度气旋式涡旋系统对于强的雷达对流回波的形成是至关重要的。而且,中尺度垂直上升运动的强弱与雷达对流回波强度成正相关,中尺度垂直上升运动越强,雷达对流回波发展

越旺盛。

从冀春晓等(2007)的分析可以知道,6 日 15 时为 Matsa 第一阶段区域平均垂直速度出现极大值和低层辐合为最强的时刻,7 日 06 时为 Matsa 第二阶段区域平均垂直速度出现次极大值和低层辐合为较强的时刻,这说明中尺度对流系统的产生,不仅有利于低层辐合的加强,而且也使台风垂直运动得到加强。以上结果说明, Matsa 能够在陆地上持续维持,与其螺旋云带中活跃着中尺度气旋式涡旋系统有非常密切的联系,这些中尺度对流系统产生剧烈的辐合和垂直上升运动,把低层暖湿空气向上输送,发生凝结并释放潜热,对 Matsa 强度的维持起到了正反馈作用。

### 3.3 中尺度扰动场特征的四维风场反演

多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演技术在理论上是先进的, Sun and Crook (1994) 进行的一些实际运用试验也被证明是有效的。但是到目前为止,多普勒雷达资料的 4DVAR 同化仍然处在试验研究阶段,特别是在国内类似研究还刚刚起步。本文使用中国气象局气象科学研究院灾害天气国家重点实验室提供的 4DVAR 同化反演系统,对台风 Matsa 登陆后的对流云带进行了局部(图 3b 黑方块区域)反演(如图 6 所示)。

从南京多普勒雷达组合反射率图(图 3b)中可以看到,台风 Matsa 登陆后直到 2005 年 8 月 7 日 06:01 时,其外围云带依然很强,外围云带中镶嵌着多个大于 45 dBZ 的强回波单体。从相应时刻仰角为  $1.37^\circ$  的雷达径向风场(图略)可以看到,在南京雷达站北侧(约 25 km)存在一个逆风区成逆时针环流分布,说明该处存在一个中尺度气旋式环流;在仰角为  $2.34^\circ$  的雷达径向风场上,该中尺度气旋式环流的面积比低仰角的要小,且中心位置向偏北方倾斜。当仰角大于  $3.5^\circ$  后,该逆风区变得模糊或不存在,说明这个中尺度气旋式环流只在低层存在。图 6 给出了使用 2005 年 8 月 7 日 06:01 时南京多普勒雷达探测资料反演(图 3b 黑方块区域)的不同高度的流场与基本反射率分布图。从图 6 可以看到,此时对流回波单体发展很旺盛,大于 30 dBZ 的强回波顶高伸展到 2.5 km 以上。在台风 Matsa 的强回波云带中存在明显的中尺度气旋式涡旋,它位于 3.5 km 以下,且中尺度气旋式涡旋中心位置随着高度的升高向偏北方发生倾斜,气旋性

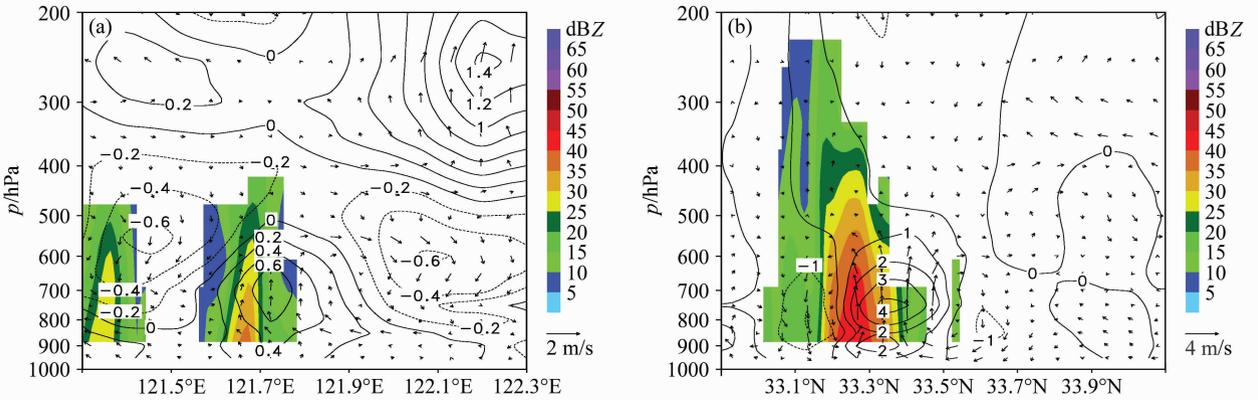


图5 2005年8月基本反射率(彩色, 单位: dBZ)、中尺度扰动垂直速度(等值线, 单位:  $10^{-1}$  m/s)和中尺度扰动合成流场(矢量)的垂直剖面图: (a) 6日15:00时, 矢量为  $(u^*, \omega^* \times 10)$ ; (b) 7日06:00时, 矢量为  $(v^*, \omega^* \times 10)$

Fig. 5 The vertical cross sections of base reflectivity (shaded), mesoscale disturbance vertical velocity (isoline, units:  $10^{-1}$  m/s), and composite mesoscale disturbance wind fields (a)  $(u^*, \omega^* \times 10)$  and (b)  $(v^*, \omega^* \times 10)$  at (a) 1500 UTC 6 Aug 2005 and (b) 0600 UTC 7 Aug 2005

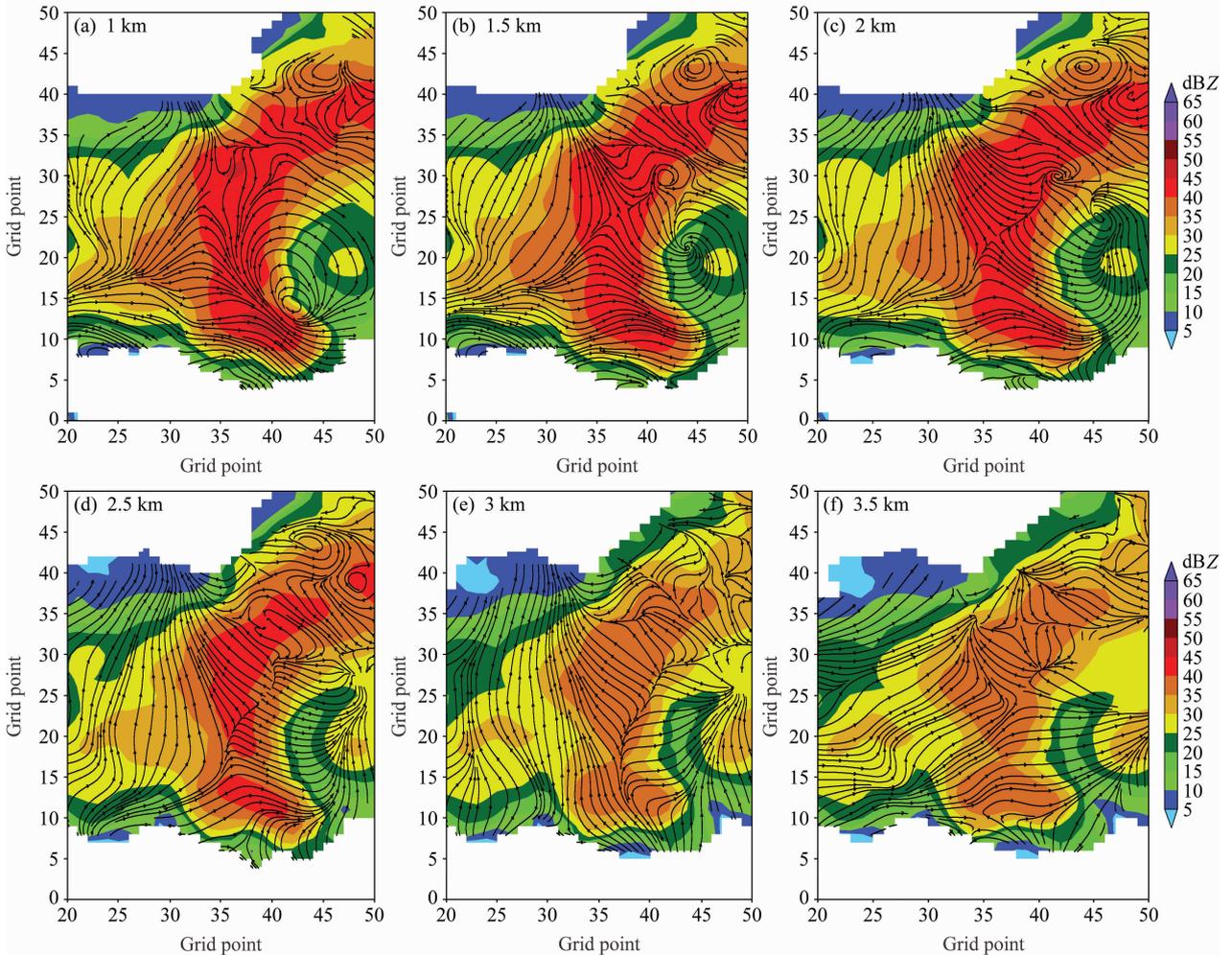


图6 2005年8月7日06:01时不同高度基本反射率(彩色, 单位: dBZ)和反演的水平流场分布图: (a) 1.0 km; (b) 1.5 km; (c) 2.0 km; (d) 2.5 km; (e) 3.0 km; (f) 3.5 km。坐标数字为格点数(下同)

Fig. 6 Base reflectivity (shaded) and streamline fields retrieved at (a) 1.0 km, (b) 1.5 km, (c) 2.0 km, (d) 2.5 km, (e) 3.0 km, and (f) 3.5 km at 0601 UTC on 7 Aug 2005

涡旋面积随着高度的增加而缩小。2 km 以下为明显的中尺度气旋式涡旋中心, 2.5~3 km 之间减弱为辐合线或辐合中心, 到 3.5 km 时辐合中心基本消失。与雷达径向风场的分析相一致。同时, 从图 6 可以发现中尺度气旋式涡旋中心位于最强回波 ( $\geq 40$  dBZ) 的一侧, 两者并不完全重合, 这与图 5 分析的结论相一致。

#### 4 Matsa 台风与其螺旋云带的中尺度系统之间的相互作用

上述分析表明, 台风 Matsa 的维持与其螺旋云带的中尺度系统活动密切相关。下面从两种尺度间动能及涡度转换出发, 讨论 Matsa 与其螺旋云带的中尺度系统的相互作用。

从陈受钧和谢安 (1981) 分析可知, 天气尺度与中尺度间相互转换项 ( $V^* \cdot I^*$ ) 包括水平运动和垂直运动的贡献, 分别为:

$$(V^* \cdot I^*)_h = -u^* \left[ \frac{\partial}{\partial x} ((uu)^* - u^* u^*) + \frac{\partial}{\partial y} ((uv)^* - u^* v^*) \right] - v^* \left[ \frac{\partial}{\partial x} ((uv)^* - u^* v^*) + \frac{\partial}{\partial y} ((vv)^* - v^* v^*) \right], \quad (1)$$

$$(V^* \cdot I^*)_v = -u^* \frac{\partial}{\partial p} ((wu)^* - w^* u^*) - v^* \frac{\partial}{\partial p} ((wv)^* - w^* v^*), \quad (2)$$

其中, ( $V^* \cdot I^*$ ) 表示中尺度系统与天气尺度系统动能的转换。正值表示中尺度运动向天气尺度系统提供动能, 负值表示中尺度系统从天气尺度系统获得动能。

垂直涡度方程中天气尺度和中尺度系统转换项  $I_\zeta^h$  的水平运动项和垂直运动项, 分别为:

$$I_\zeta^h = -\frac{\partial}{\partial x} ((\zeta u)^* - \zeta^* u^*) - \frac{\partial}{\partial y} ((\zeta v)^* - \zeta^* v^*) - \frac{\partial}{\partial x} ((\zeta v)^* - \zeta^* v^*) - \frac{\partial}{\partial y} ((\zeta u)^* - \zeta^* u^*), \quad (3)$$

$$I_\zeta^h = -\frac{\partial}{\partial p} ((\zeta \omega)^* - \zeta^* \omega^*) \quad (4)$$

其中,  $I_\zeta > 0$  表示两种尺度相互作用的结果是中尺度系统给天气尺度系统提供正涡度;  $I_\zeta < 0$  表示天气尺度系统给中尺度系统提供正涡度。

为了详细讨论台风 Matsa 在陆地上持续维持期间与其环流中的中尺度系统之间的相互作用, 我

们选用移动坐标, 取台风为中心的 ( $15 \times 15$ ) 经纬度范围为台风区域, 对式 (1)、(2) 计算区域平均动能转换项  $[V^* \cdot I^*]$  ( $[\ ]$  表示取区域平均), 带“\*”的值由原始值减去区域平均值得到。用式 (3)、(4) 计算区域平均涡度转换项  $[I_\zeta]$ , 如图 7 所示。对  $[V^* \cdot I^*]$  和  $[I_\zeta]$  从地面至 100 hPa 进行垂直积分, 得到整层的  $[V^* \cdot I^*]$  和  $[I_\zeta]$  值 (见图 8)。

#### 4.1 台风与其螺旋云带的中尺度系统之间的动能转换

图 7a 为天气尺度与中尺度之间区域平均动能的水平运动转换项  $[V^* \cdot I^*]_h$ , 图 7b 为垂直运动转换项  $[V^* \cdot I^*]_v$ , 图 7c 为水平运动和垂直运动转换两者之和  $[V^* \cdot I^*]$ 。对比图 7a 和图 7b 可以看到,  $[V^* \cdot I^*]_h$  比  $[V^* \cdot I^*]_v$  基本属于同一个量级, 最大的转换都出现在高层, 但两者对动能转换却起着相反的作用。在第一阶段 (6 日 00~18 时),  $[V^* \cdot I^*]_h$  的作用在低层是 Matsa 从中尺度运动中获得动能, 极大值位于 900 hPa 附近; 高层是 Matsa 向中尺度系统提供动能。  $[V^* \cdot I^*]_v$  的作用与前者刚好相反。低层 Matsa 向中尺度系统提供动能, 极大值也位于 900 hPa 附近; 高层是 Matsa 从中尺度系统中获得动能。两者共同的作用  $[V^* \cdot I^*]$  (图 7c) 表明, 在 800 hPa 以下为负值, Matsa 向中尺度系统提供动能, 极小值在 900 hPa 附近; 800 hPa 以上为正值, Matsa 从中尺度运动中获得动能, 极大值在 650 hPa 附近。但  $[V^* \cdot I^*]$  负值的绝对值几乎是其正值的两倍, 说明近地层以动能的垂直转换为主, Matsa 向中尺度系统提供动能。整层积分结果 (图 8a) 表明,  $[V^* \cdot I^*]$  均为正值, 说明 Matsa 在这一阶段从中尺度系统获得了动能。所以, 虽然 Matsa 登陆后的强度迅速减弱, 但仍然可以维持热带风暴的强度。

到第二阶段 (6 日 18 时~8 日 21 时), 高层动能转换明显增加, 而低层动能转换却有所减弱。  $[V^* \cdot I^*]_h$  (图 7a) 的作用表现为两种情况: 6 日 18 时~8 日 12 时期间, 正负分布成双层结构, 500 hPa 以下、250~300 hPa 之间为正值区, 300~500 hPa、250 hPa 以上为负值区, 而且高空负值的绝对值要明显大于低层的正值, 说明高层动能转换明显要大于低层转换。而  $[V^* \cdot I^*]_v$  (图 7b) 的正负结构分布与  $[V^* \cdot I^*]_h$  刚好相反, 负值主要分布在 600 hPa 以下, 正值主要分布在 250 hPa 以上,

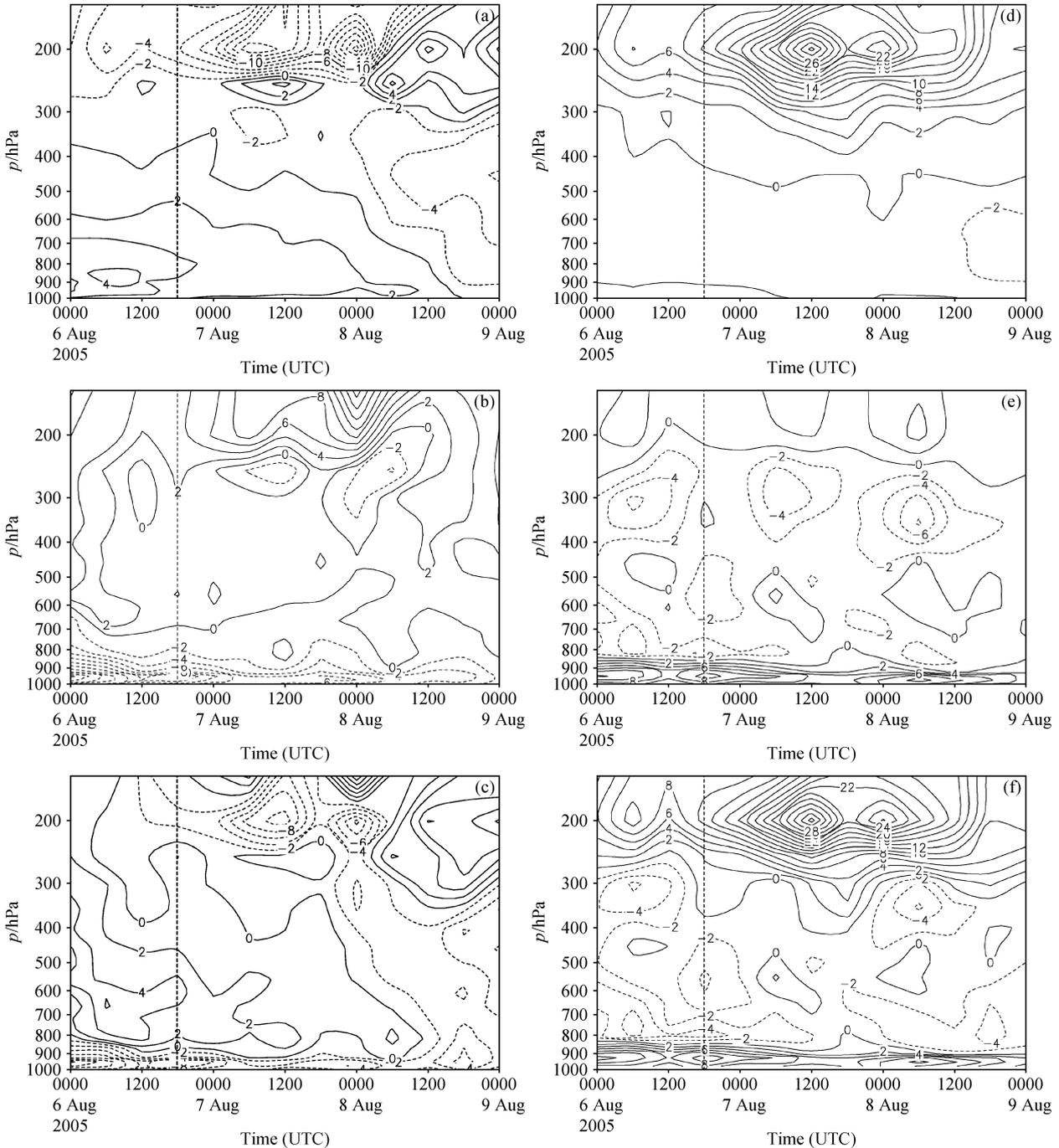


图7 区域平均动能转换项 (a-c, 单位:  $10^{-4} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 和区域平均涡度转换项 (d-f, 单位:  $10^{-10} \text{ s}^{-2} / \text{m}^2$ ) 时间演变图: (a)  $[V^* \cdot I^*]_h$ ; (b)  $[V^* \cdot I^*]_v$ ; (c)  $[V^* \cdot I^*]$ ; (d)  $[I_\xi^h]$ ; (e)  $[I_\xi^v]$ ; (f)  $[I_\xi]$

Fig. 7 Temporal evolution of (a-c) regionally averaged kinetic energy conversion ( $10^{-4} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) and (d-f) regionally averaged vorticity conversion ( $10^{-10} \text{ s}^{-2} / \text{m}^2$ ): (a)  $[V^* \cdot I^*]_h$ ; (b)  $[V^* \cdot I^*]_v$ ; (c)  $[V^* \cdot I^*]$ ; (d)  $[I_\xi^h]$ ; (e)  $[I_\xi^v]$ ; (f)  $[I_\xi]$

中间的垂直转换相对较弱。8日12时~9日00时期间,  $[V^* \cdot I^*]_h$  与  $[V^* \cdot I^*]_v$  结构分布是一致的, 即表现为正负分布单层结构。  $[V^* \cdot I^*]_h$  在300 hPa以下 Matsa 向中尺度系统提供动能, 300 hPa

以上 Matsa 从中尺度系统获得动能。  $[V^* \cdot I^*]_v$  在700 hPa以下 Matsa 向中尺度系统提供动能, 700 hPa以上 Matsa 从中尺度系统获得动能。两项的综合作用  $[V^* \cdot I^*]$  (图7c) 的结果显示, 动能的

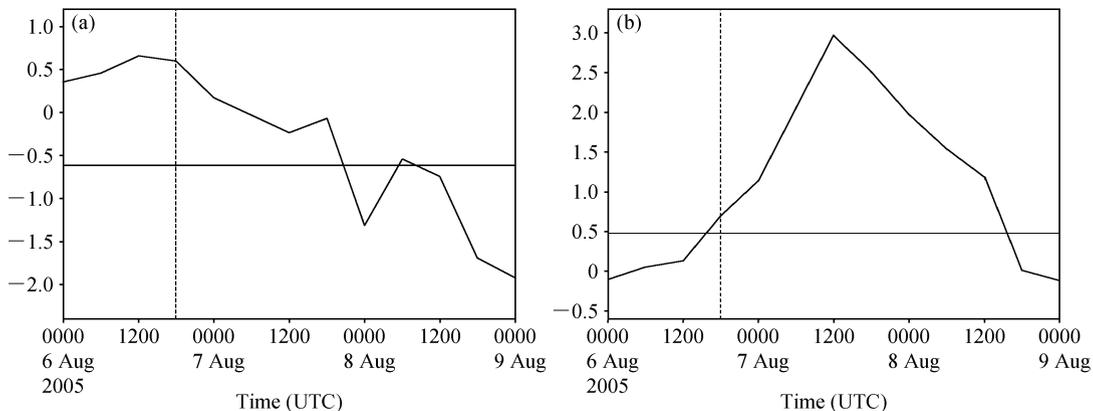


图 8 区域平均动能转换项 (a, 单位:  $W \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot hPa^{-1}$ ) 和区域平均涡度转换项 (b, 单位:  $10^{-6} s^{-2} \cdot m^{-2} \cdot hPa^{-1}$ ) 从地面至 200 hPa 垂直积分时间演变图

Fig. 8 Temporal evolution of (a) regionally averaged kinetic energy conversion ( $W \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot hPa^{-1}$ ) and (b) regionally averaged vorticity conversion ( $10^{-6} s^{-2} \cdot m^{-2} \cdot hPa^{-1}$ ) vertically integrated from surface to 100 hPa

转换随高度的变化正负交替出现, 主要以高层的动能转换为主。[ $V^* \cdot I^*$ ] 低层为负, 说明 Matsa 失去动能, 中尺度系统从 Matsa 获得动能, 这一结论说明低层 Matsa 环流中的中尺度系统得到明显发展。从整层积分的结果 (图 8a) 来看, 6 日 18 时~7 日 21 时期间, [ $V^* \cdot I^*$ ] 整层积分均为正值, 即中尺度系统向 Matsa 提供动能。从 7 日 21 时~9 日 00 时, [ $V^* \cdot I^*$ ] 整层积分均为负值, 即 Matsa 向中尺度系统提供动能。以上分析结果表明, [ $V^* \cdot I^*$ ] 低层为负, 说明中尺度系统从台风 Matsa 环流中获得动能而发展, 这应该是 Matsa 环流中低层活跃着中尺度系统的原因之一; [ $V^* \cdot I^*$ ] 的正值主要出现在高层, 即高层的中尺度扰动为 Matsa 提供动能。所以, Matsa 在陆地上长久维持主要是从高层获得动能。

#### 4.2 台风与中尺度系统之间的涡度转换

[ $I_{\zeta}^h$ ] 是区域平均涡度水平运动转换项 (图 7d)。它的作用主要表现在中高层, 而且在第二阶段 7 日 12 时和 8 日 00 时, 200 hPa 附近分别存在两个极大值中心。[ $I_{\zeta}^h$ ] > 0, 说明中尺度系统向 Matsa 提供正涡度。[ $I_{\zeta}^v$ ] 为区域平均涡度垂直运动转换项, 如图 7e 所示。在低层和高层, [ $I_{\zeta}^v$ ] > 0, 而且低层正值要明显大于高层正值, 说明在低层中尺度系统主要通过垂直运动向 Matsa 提供正涡度。[ $I_{\zeta}^v$ ] 的负值区主要位于中高层, Matsa 向中尺度系统提供正涡度。图 7f 为水平运动和垂直运动转换两者之和 [ $I_{\zeta}$ ]。[ $I_{\zeta}$ ] 的结果表明 (图 7f), 800 hPa 以下和

300 hPa 以上, [ $I_{\zeta}$ ] > 0, 而在 800~300 hPa 之间, 几乎 [ $I_{\zeta}$ ] < 0, 说明 Matsa 所需要的正涡度主要来自于低层和高层的中尺度扰动。[ $I_{\zeta}$ ] 整层积分结果如图 8b 所示, 在第一阶段, [ $I_{\zeta}$ ] 整层积分几乎都为负, Matsa 失去正涡度, 而中尺度系统得到正涡度, 实况表现为 Matsa 气旋性环流强度的迅速减弱和中尺度系统的发展。在第二阶段, 除 8 月 8 日 15 时~9 日 00 时为负值外, 其他时间 [ $I_{\zeta}$ ] 整层积分结果均为正, 中尺度系统向 Matsa 提供正涡度。

上面的分析结果说明, 在低层, 台风 Matsa 通过水平运动为其螺旋云带中的中尺度系统提供动能, 激发中尺度系统的发生发展, 产生中尺度气旋性涡旋; 而中尺度系统通过其垂直运动将正涡度向台风输送。所以, 中尺度系统所产生的正涡度以及向 Matsa 的转换, 对 Matsa 在陆地的长久维持起到了非常重要的作用。

## 5 小结与讨论

本文使用新一代中尺度 WRF 模式对台风 Matsa 登陆后的路径和强度变化特征进行了较成功的数值模拟, 采用 4DVAR 风场反演技术对台风 Matsa 多普勒雷达资料进行了风场反演。在此基础上对台风 Matsa 登陆后中尺度扰动特性进行了初步探讨, 对台风 Matsa 与其环流中的中尺度系统之间相互作用进行了诊断分析。台风 Matsa 登陆后强度的持续维持与其环流中活跃的中尺度扰动有着非常密切的关系。

(1) 地面中尺度自动站和多普勒雷达资料的分析都表明, 台风 Matsa 的螺旋云带中活跃着中尺度气旋式涡旋系统。

(2) 数值模拟和风场反演结果也表明, 台风 Matsa 的螺旋云带中在低层活跃着中尺度气旋式涡旋系统, 与之相伴随的为较强的中尺度上升区域, 而且, 中尺度垂直上升运动的强弱与雷达对流回波强度呈正相关, 中尺度垂直上升运动越强, 雷达对流回波发展越旺盛。但最强的雷达回波中心与中尺度上升运动中心并不完全重合。

(3) 台风 Matsa 与中尺度系统动能转换的诊断分析说明, 低层中尺度系统从台风 Matsa 环流中获得动能而发展, Matsa 在陆地上长久维持主要是从高层获得动能。

(4) 台风 Matsa 与中尺度系统涡度转换的诊断分析说明, 低层中尺度系统向 Matsa 输送正涡度主要依靠中尺度垂直运动来完成, 高层正涡度的转换通过水平输送和垂直输送共同来完成。所以, 中尺度系统所产生的正涡度源源不断地向 Matsa 转换, 使 Matsa 的气旋性环流可以在陆地上长久维持。

### 参考文献 (References)

Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 569–585.

Chen L S. 1998. Decay after landfall [C]//WMO/ TD, 875: 1–5.

陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤. 2002. 热带气旋动力学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 317pp.

Chen Lianshou, Xu Xiangde, Luo Zhexian. 2002. Introduction to Tropical Cyclone Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 317pp.

陈受钧, 谢安. 1981. 次天气尺度与天气尺度系统间动能交换的诊断分析 [J]. *气象学报*, 39 (4): 408–415.

Chen Shoujun, Xie An. 1981. The exchange of kinetic energy between synoptic and subsynoptic-scale motion [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 39 (4): 408–415.

陈永林, 王智, 杨引明. 2008. 0509 号麦莎台风次天气尺度系统的非对称性结构特征分析 [J]. *大气科学研究与应用*, (1): 9–17.

Chen Yonglin, Wang Zhi, Yang Yinming. 2008. Analysis of asymmetric characteristics on the sub-synoptic scale systems of typhoon Matasa (0509) [J]. *Atmospheric Science Research and Application (in Chinese)*, (1): 9–17.

DeMaria M. 1996. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53: 2076–2087.

邓国, 周玉淑, 李建通. 2005. 台风数值模拟中边界层方案的敏感

性试验 I: 对台风结构的影响 [J]. *大气科学*, 29 (3): 417–428.

Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. 2005. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I: The effects on the structure of typhoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (3): 417–428.

段丽, 陈联寿. 2005. 热带风暴“菲特”(0114)特大暴雨的诊断研究 [J]. *大气科学*, 29 (3): 343–353.

Duan Li, Chen Lianshou. 2005. Diagnostic analysis and numerical study of torrential rain associated with the tropical storm Fitow (0114) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (3): 343–353.

Emanuel K A. 1988. The maximum intensity of hurricanes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45: 1143–1155.

Janjić Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 927–945.

Janjić Z I. 2000. Comments on “development and evaluation of a convection scheme for use in climate models” [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57: 3686.

冀春晓, 陈联寿, 赵放. 2007. 登陆台风 Matsa 维持机理的数值研究 [J]. *气象学报*, 65 (6): 888–894.

Ji Chunxiao, Chen Lianshou, Zhao Fang. 2007. A numerical study on sustaining of land-falling typhoon Matsa [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (6): 888–894.

Jones S C. 2000. The evolution of vortices in vertical shear. Part III: Baroclinic vortices [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126: 3161–3185.

励申申, 寿绍文, 王信. 1992. 登陆台风与其外围暴雨的相互作用 [J]. *气象学报*, 50 (1): 33–41.

Li Shenshen, Shou Shaowen, Wang Xin. 1992. The interaction between the landed typhoon and its external heavy rain [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 50 (1): 33–41.

李英, 陈联寿, 徐祥德. 2004. 登陆热带气旋长久维持的次天气尺度环流特征 [J]. *气象学报*, 62 (3): 257–268.

Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2004. The characteristics of sub-synoptic scale circulation of tropical cyclones sustaining over land [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (3): 257–268.

李英, 陈联寿, 王继志. 2005a. 热带气旋登陆维持和迅速消亡的诊断研究 [J]. *大气科学*, 29 (3): 482–490.

Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2005a. Diagnostic study of the sustaining and decaying of tropical cyclones after landfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (3): 482–490.

李英, 陈联寿, 徐祥德. 2005b. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. *大气科学*, 29 (1): 91–98.

Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2005b. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 91–98.

Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22: 1065–1092.

- Montgomery M T, Kallenbach R J. 1997. A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123: 435-465.
- 孙建华, 周海光, 赵思雄. 2006. 2003 年 7 月 3~5 日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1104-1118.
- Sun Jianhua, Zhou Haiguang, Zhao Sixiong. 2006. An observational study of mesoscale convective systems producing severe heavy rainfall in the Huaihe River basin during 3-5 July 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1104-1118.
- Sun J Z, Crook A. 1994. Wind and thermodynamic retrieval from single-Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix II [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 1075-1091.
- Sun J Z, Crook N A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54: 1642-1661.
- Sun J Z, Crook N A. 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 835-852.
- Sun J Z, Flicker D W, Lilly D K. 1991. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48: 876-892.
- 王继志, 杨元琴. 1995. 8807 号台风突然增强与其中尺度关系的研究 [M]//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三分册. 北京: 气象出版社, 87-94.
- Wang Jizhi, Yang Yuanqin. 1995. Numerical simulation on heavy rainfall caused by typhoon in South China Sea [M]//Report on Typhoon Scientific Experiment and Synoptic/Dynamics Theoretical Study, Vol. 3 (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 87-94.
- 王俊, 俞小鼎, 邵庆国, 等. 2011. 一次强烈雹暴的三维结构和形成机制的单、双多普勒雷达分析 [J]. *大气科学*, 35 (2): 247-285.
- Wang Jun, Yu Xiaoding, Tai Qingguo, et al. 2011. Analysis on the three-dimensional structure and formation mechanism of a severe hailstorm with single- and dual-Doppler radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (2): 247-285.
- Wang Y, Wu C C. 2004. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes: A review [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 87: 257-278.
- Wu B, Verlinde J, Sun J Z. 2000. Dynamical and microphysical retrievals from Doppler radar observations of a deep convective cloud [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57 (2): 262-283.
- 于玉斌, 段海霞, 炎利军, 等. 2008. 超强台风“桑美”(2006) 近海急剧增强过程数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1365-1378.
- Yu Yubin, Duan Haixia, Yan Lijun, et al. 2008. Numerical simulation of rapid intensification change of super typhoon Saomai (2006) over the coastal water of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1365-1378.
- 袁金南, 谷德军, 梁建茵. 2005. 地形和边界层摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的研究 [J]. *大气科学*, 29 (3): 429-437.
- Yuan Jinnan, Gu Dejun, Liang Jianyin. 2005. A study of the influence of topography and boundary layer friction on landfalling tropical cyclone track and intensity [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (3): 429-437.
- 周海光, 王玉彬. 2005. 2003 年 6 月 30 日梅雨锋大暴雨  $\beta$  和  $\gamma$  中尺度结构的双多普勒雷达反演 [J]. *气象学报*, 63 (3): 301-312.
- Zhou Haiguang, Wang Yubin. 2005. Structure of meso- $\beta$  and - $\gamma$  scale on Meiyu in Huaihe River basin on 30 June, 2003 by dual-Doppler radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (3): 301-312.