

张元春, 孙建华, 徐广阔, 等. 2013. 江淮流域两次中尺度对流涡旋的结构特征研究 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 271–287, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11162. Zhang Yuanchun, Sun Jianhua, Xu Guangkuo, et al. 2013. Analysis on the structure of two mesoscale convective vortices over Yangtze–Huaihe River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 271–287.

江淮流域两次中尺度对流涡旋的结构特征研究

张元春^{1,2} 孙建华^{1,3} 徐广阔¹ 齐琳琳⁴

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 中国气象科学院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

⁴ 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

摘要 对 2003、2007 年江淮梅雨期的中尺度对流涡旋 (MCV) 进行了统计分析, 结果表明我国梅雨锋上 MCV 活跃, 这些 MCV 与强降水有关。2003、2007 年江淮梅雨期有 9 个 MCV 发生, 大多数的 MCV 发生在 32°N~35°N 之间的江苏境内。采用 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 的资料分析系统 (ADAS) 和 WRF 模式模拟了 2 个 MCV 的发展过程, 并使用数值模拟结果分析了它们的结构特征。MCV 一般发生在强对流系统的北侧, 其涡旋环流一般在 600 hPa 以下, 对应涡旋区域对流层高层为强辐散, 涡度最强的中心在对流层中层, 但正涡度区可伸展到 300 hPa。初始阶段 MCV 的中心为上升运动和中性层结, 成熟阶段 MCV 的中心转为下沉运动, 同时其南侧有新的对流发生。发展型和不发展型的 MCV 对比发现, 涡旋对流层高层有涡度增加以及二次对流的潜热释放多, 可能是发展型 MCV 维持时间较长的原因。此外, MCV 发展过程中南侧急流的增强对 MCV 中对流的触发和维持有一定作用。

关键词 中尺度对流涡旋 结构特征 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2013) 03-0271-17

中图分类号 P447

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11162

Analysis on the Structure of Two Mesoscale Convective Vortices over Yangtze–Huaihe River Basin

ZHANG Yuanchun^{1,2}, SUN Jianhua^{1,3}, XU Guangkuo¹, and QI Linlin⁴

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

⁴ Institute of Aeronautical Meteorology and Chemical Defense, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100085

Abstract The statistics of mesoscale convective vortices (MCVs) occurring in the Yangtze–Huaihe River basin during the Meiyu period of 2003 and 2007 show that MCVs along the Meiyu front were highly active and could have induced severe flooding. Most of the nine MCVs identified during Meiyu period of 2003 and 2007 were formed at 32°N–35°N near the Jiangsu Province. The WRF (Weather Research and Forecasting) model and the ARPS (Advanced Regional Prediction System) data analysis system (ADAS) are employed to simulate two MCVs, in order to study the development and structure of MCVs. It is determined that MCVs form to the north of convection system with a closed vortex

收稿时间 2011-10-24 收到, 2012-04-10 收到修定稿

资助项目 灾害天气国家重点实验室基金 2009LASW-A03, 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB417201, 国家自然科学基金项目 41205027、41005030

作者简介 张元春, 女, 1987 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度天气动力学研究。E-mail: zhyc@mail.iap.ac.cn

通讯作者 孙建华, E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

circulation maintained below 600 hPa and a vorticity maximum in the middle troposphere. In addition, positive vorticity could reach 300 hPa. The evolution of MCVs can be divided into three stages: Initiation, maturity, and dissipation. During the initiation stage, an updraft can be found in the center of the MCV with neutral stratification. During the mature stage, a downdraft occurs in the center of the MCV, and secondary convections develop southeast region of the MCV. Compared with undeveloped MCVs, developed MCVs may result from the increase of vorticity in the high-level troposphere and more latent heating from secondary convections. Furthermore, the intensified jet is favorable for the triggering and development of new convections of the MCV.

Keywords Mesoscale convective vortices, Structure, Numerical simulation

1 引言

中尺度对流涡旋 (MCV) 是指产生于中尺度对流系统 (MCS) 系统层状云降水区中层的气旋性涡旋 (Brown, 1979), Maddox (1983) 发现并研究了这种存在于对流层中层的气旋性涡旋。Zhang and Fristch (1987, 1988) 总结了美国中部 MCV 的一些特征: 发生在对流层中层, 具有暖心结构; 最大涡度约在 600~700 hPa 之间, 空间尺度约为 100~400 km; 如能达到惯性稳定, 生命史可持续几天的时间。Bartels and Maddox (1991) 研究了 1981~1988 年美国中部出现的 MCV 指出, MCV 是大部分发生在较大的 α 中尺度对流系统中, 只有少数出现在尺度较小、生命期较短的 MCS 中, 能够观测到 MCV 的 MCS 大约只占 MCS 的 5%, 而 50% 的中尺度对流复合体 (MCC) 中可以发现 MCV。Trier et al. (2000) 采用雷达资料研究 MCV 后发现 12% 的 MCS 中可以识别出 MCV。Jorgenson et al. (1997)、Yu et al. (1999) 发现 MCV 不仅可以形成于 MCS 消散后的层状云中, 还可以形成于 MCS 的强对流区。

近年来, 随着观测资料时间和空间分辨率的提高以及数值模式的发展, 有关 MCV 的研究也越来越深入。Bartels and Maddox (1991) 指出 MCV 一般产生在“母对流系统”(Parent MCS) 减弱消亡后, 并会引起“第二次对流”(secondary convection) 的发生发展。Trier et al. (2000) 也指出 MCV 的一个重要特征是可以引起第二次对流的发展, 并在其邻近地区导致强阵雨的发生。Kirk (2007) 根据以往是一些研究成果, 将 MCV 产生和加强的机制归纳为: 中低层辐合向上发展对 MCV 的产生有重要作用 (Zhang and Fritsch, 1988; Olsson and Cotton, 1997); MCC 层状云中的中层辐合向下发展是涡度产生的源 (Chen and Frank, 1993)。另外, 中层辐合、水平平流、和倾斜项辐合与行星涡度的相互作

用、以及高层与中尺度低压中心对应的暖中心对 MCV 也有重要的作用 (Brandes, 1990; Verlinde and Cotton, 1990; Zhang, 1992; Skamarock et al., 1994; Weisman and Davis, 1998; Cram et al., 2002; Knievel and Johnson, 2003)。

针对梅雨锋上的 MCS 和低涡也有不少研究工作, 梅雨锋上除了东移的西南涡外, 还有大量涡旋活动 (高坤和徐亚梅, 2001; 孙建华等, 2004; 张小玲等, 2004)。石定朴等 (1996) 分析一个副热带高压内发生的 MCS 在消散阶段演变成低涡的例子, 认为这种低涡可能是凝结潜热加热产生的对流层中尺度高压的反应。丁一汇 (1993)、高坤和徐亚梅 (2001) 分别研究了 1991 年淮河暴雨中尺度雨带和 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡的形成机制。孙建华等 (2004) 的研究表明低层暖平流可能是 2002 年国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 中国暴雨试验期间一次梅雨锋 MCV 东移发展的原因之一。朱爱军和潘益农 (2007) 的研究表明 MCV 的移动主要由大尺度背景风场引导, 而其中辐合作用直接决定了 MCV 的形成与发展。由于 MCV 的尺度较小, 发展较快, 仅利用常规观测资料难以对 MCV 进行深入的研究, 同时, 国内对其演变过程及结构特征的研究也还不多见。本文在 2003、2007 年淮河流域梅雨期 MCV 统计分析的基础上, 选取 2 次 MCV 过程进行研究, 主要利用模式输出结果对 2 次 MCV 的发展过程和结构特征进行研究。研究主要问题有: (1) 梅雨期江淮流域 MCV 的分布和路径? (2) 江淮流域 MCV 有什么样的结构特征?

2 江淮流域 MCV 的统计分类

2003、2007 年梅雨期淮河流域都出现了严重的洪涝灾害。2003 年江淮梅雨期为 6 月 21 日~7 月 11 日, 与气候平均的梅雨期相近, 降水总量为 200~

500 mm, 安徽和江苏大部分地区降水量在 400 mm 以上(矫梅艳等, 2004; 张庆云等, 2004)。2007 年入梅正常, 但出梅较常年偏晚, 梅雨期比气候平均长两周左右, 降水集中在 6 月 19 日~7 月 26 日。淮河流域降水在 500 mm 以上, 淮河干流大部分地区降水大于 600 mm, 局部超过了 800 mm(赵思雄等, 2007)。MCV 的统计分类使用如下资料: 卫星 TBB (Temperature of Black Body) 资料研究 2003 和 2007 年的对流活动, 其中, 2003 年的 TBB 资料来自日本 GMS 气象卫星, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.05° (纬度) $\times 0.05^{\circ}$ (经度); 2007 年的 TBB 资料来自中国气象局的 FY-2C 卫星, 其时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.1° (纬度) $\times 0.1^{\circ}$ (经度)。此外, 还用到了 NCEP 的 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 再分析资料(其时间分辨率为 6 h)以及来自中国气象局的降水资料。

美国的中尺度对流涡旋(MCV)一般是指产生于 MCS 系统层状云降水区中层的气旋性涡旋(Brown, 1979), 本文对 MCV 的识别基本采用了美国的标准, 即产生于 MCS 层状云降水区的气旋性涡旋, 但由于梅雨锋上的涡旋一般存在于中下层, 涡旋的闭合环流一般在 700 hPa 最清楚, 因此, 本文对 MCV 的定义为: 引发降水的 MCS 在发展至减弱阶段后, 在同一地区或邻近地区 700 hPa(或 850 hPa) 高度上有闭合涡旋环流出现。对于 MCV 是否发展的标准为: MCV 产生后, 卫星云图上新生的对流系统生命史在 6 h 以上, 且在其演变过程中有明显增强趋势。根据 MCV 造成的降水量, 强降水过程为 24 h 降水量在 50 mm 以上, 而且在 MCV 覆盖的范围内满足暴雨的站点超过 5 个, 不满足以上条件则为弱降水。本研究中采用 MCV 新生对流系统的生命史及其发展过程中是否有明显增强趋势为 MCV 发展与否的标准, 是为了体现 MCV 的“二次对流”的作用, 而且一些研究已经表明“二次对流”是 MCV 长时间维持的主要原因。本文的研究区域为江淮流域, 由于 NCEP 资料的分辨率有限, 我们能够识别的涡旋水平尺度的都在 500 km 以上, 对一些尺度较小、生命史较短的 MCV 无法识别出来。

2003 年梅雨期淮河流域 6 次主要降水过程中, 7 月 2 日和 7 月 3~5 日的暴雨过程分别有 1 个 MCV, MCV 对流系统区域位于江苏的北部和中部, 生成后 MCV 没有发展, 均造成了较强的降水(表

1)。2007 年梅雨期发生在淮河流域的 11 次主要降水过程中, 有 7 个 MCV 生成, 对流系统的区域分别为湖北东部、鄂赣交界、江苏中东部、苏皖交界、湖北中部以及江苏东部等地区(表 1), 其中, 发展型的 MCV 有 4 个, 不发展型的有 3 个, 并造成了强弱不等的降水。从 9 个 MCV 的发展情况与降水的关系看, 一般情况下, 发展的 MCV 对应较强的降雨, 但有些不发展的个例也产生了较强的降雨, 这可能是由于梅雨锋上涡旋本身的降雨与梅雨锋上其他对流系统引发的降雨无法分开造成的, 此外, 梅雨锋上决定降雨强弱的因素较多, 涡旋的发展只是必要条件之一。

表 1 2003 年和 2007 年梅雨期 MCV 的发生发展情况

Table 1 The triggering and development of MCVs (mesoscale convective vortex) during Meiyu season in 2003 and 2007

降水过程	对流系统区域	MCV 是否发展	造成的降水强度	MCV 编号
2003 年 7 月 2 日	江苏北部	不发展	强	MCV1
2003 年 7 月 3~5 日	江苏中部	不发展	强	MCV2
2007 年 6 月 19~20 日	湖北东部	发展	弱	MCV3
2007 年 6 月 26~28 日	鄂赣交界	不发展	弱	MCV4
2007 年 6 月 29 日~7 月 1 日	江苏东部	不发展	弱	MCV5
2007 年 7 月 2~3 日	江苏中东部	发展	强	MCV6
2007 年 7 月 7~9 日	江苏北部	发展	强	MCV7
2007 年 7 月 13~15 日	湖北中部	发展	强	MCV8
2007 年 7 月 24~25 日	江苏东部	不发展	弱	MCV9

表 2 是对 9 个 MCV 的生成和消亡的地点、时间的统计, 其地点由风场的气旋性环流中心位置确定, 时间结合环流和 TBB 图确定。可以看出, 生成地点位于江苏的 MCV 占 6 个, 位于鲁豫交界的占 2 个, 还有 1 个位于山东北部。从 MCV 形成的纬度来看, 大多数的 MCV 发生在 $32^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 之间, 共 7 个, 从而也说明了我国的淮河流域梅雨期有利于 MCV 的发展。从消亡地点上来看, 有 7 个消亡于江苏境内及以东海面, 另外 2 个分别消亡于山东东北部和鲁豫交界处。从生成时间上来看, 5 个形成于 06:00(协调世界时, 下同)至 12:00, 3 个形成于 18:00 至 00:00, 分别对应降水的午后和夜间降水峰值。图 1 是 2003 年和 2007 年 9 个 MCV 的移动路径图, 有 2 个(MCV2、MCV5)为静止发展, 其余 7 个在发展过程中均向东移动, 其中以 MCV1、MCV3、MCV4、MCV7 和 MCV8 移动的距离较远, MCV6 和 MCV9 移动距离较近, 大多数

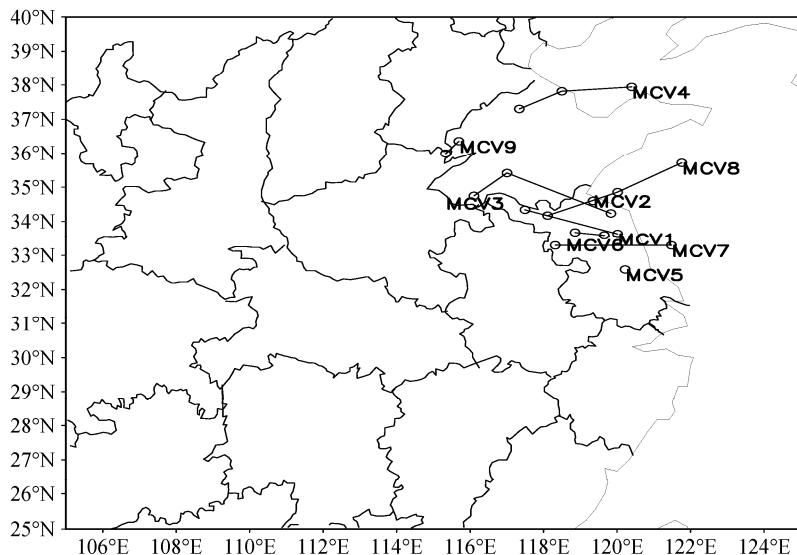


图 1 2003、2007 年梅雨期江淮流域 9 个 MCV 的移动路径

Fig. 1 The tracks of nine MCVs over Yangtze-Huaihe River basin during Meiyu season in 2003 and 2007

MCV 的移动路径均通过了苏北及淮河流域下游地区。对 2003 年和 2007 年江淮流域梅雨期 MCV 生成地点的统计结果与张小玲等 (2004) 和 Adachi 和 Kimura (2007) 的统计结果一致, 即 115°E 以东多梅雨锋初生气旋造成的暴雨。

表 2 MCV 生成和消亡的地点、时间统计

Table 2 The location, timing of triggering and decaying of MCVs

MCV 编号	生成地点	生成时间		消亡时间	
		(协调世界时)	消亡地点	(协调世界时)	消亡地点
MCV1	江苏北部	2003 年 7 月 2 日 06:00	江苏东部	2003 年 7 月 2 日 12:00	
MCV2	江苏东北部	2003 年 7 月 4 日 20:00	江苏东北部	2003 年 7 月 5 日 04:00	
MCV3	鲁豫交界	2007 年 6 月 20 日 06:00	江苏东部	2007 年 6 月 20 日 18:00	
MCV4	山东北部	2007 年 6 月 27 日 06:00	山东东北部	2007 年 6 月 27 日 18:00	
MCV5	江苏中东	2007 年 6 月 30 日 18:00	江苏中东	2007 年 7 月 1 日 00:00	
MCV6	江苏中东	2007 年 7 月 3 日 06:00	江苏东部	2007 年 7 月 3 日 14:00	
MCV7	江苏西部	2007 年 7 月 8 日 12:00	江苏东部	2007 年 7 月 8 日 00:00	
MCV8	江苏北部	2007 年 7 月 15 日 00:00	江苏东部	2007 年 7 月 15 日 12:00	
MCV9	鲁豫交界	2007 年 7 月 25 日 18:00	鲁豫交界	2007 年 7 月 26 日 00:00	

以上分析表明, 江淮梅雨期多 MCV 发展, 而

且 MCV 带来的降雨较强。由于 MCV 可分为发展型和不发展型, 因此, 下面将挑选 2 个个例: 2003 年 7 月 4~5 日 (MCV2, 不发展型, 下面简称 ND-MCV) 和 2007 年 7 月 8~9 日 (MCV7, 发展型, 下面简称 D-MCV), 揭示发展型和不发展型 MCV 的结构特征。

这里首先分析 2 个 MCV 的 TBB 演变。2003 年 7 月 4 日 18:00 (图 2a), 在淮河流域 ($31.5^{\circ}\text{N} \sim 33^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ}\text{E} \sim 119^{\circ}\text{E}$) 有一个云顶最低温度达 -70°C 以下的云团, 4 日 20:00 ND-MCV 生成, 云团面积增大, 云顶最低温度仍维持在 -70°C 以下, 此时对流活动加强 (图 2b、2c), 之后, 在 MCV 的中心区域的对流逐渐减弱, 在 MCV 的南部和东南部有新的对流发生。5 日 10:00 在原来对流活跃区的南侧仍有对流活动在发展 (图 2d)。2007 年 7 月 8 日 08:00 (图 3), 在湖北东部地区 ($31^{\circ}\text{N} \sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\text{E} \sim 116^{\circ}\text{E}$) 有一个云顶最低温度达 -70°C 的云团发展, 8 日 10:00, 云团面积增大, 云顶最低温度仍维持在 -70°C 以下, 此时对流活动加强。到 8 日 12:00, 云团面积减小, 对流有所减弱。随着 D-MCV 的生成及发展, 8 日 22:00, 云团面积增大, 其范围覆盖了约 ($31^{\circ}\text{N} \sim 33^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$) 之间的大部分地区。以上分析表明, ND-MCV 形成后引发的对流相对于母对流系统的位置变化较小, 基本是在原来的区域发展的。而 D-MCV 引发的对流系统则是在母对流系统的东部地区发展。D-MCV 同 Trier

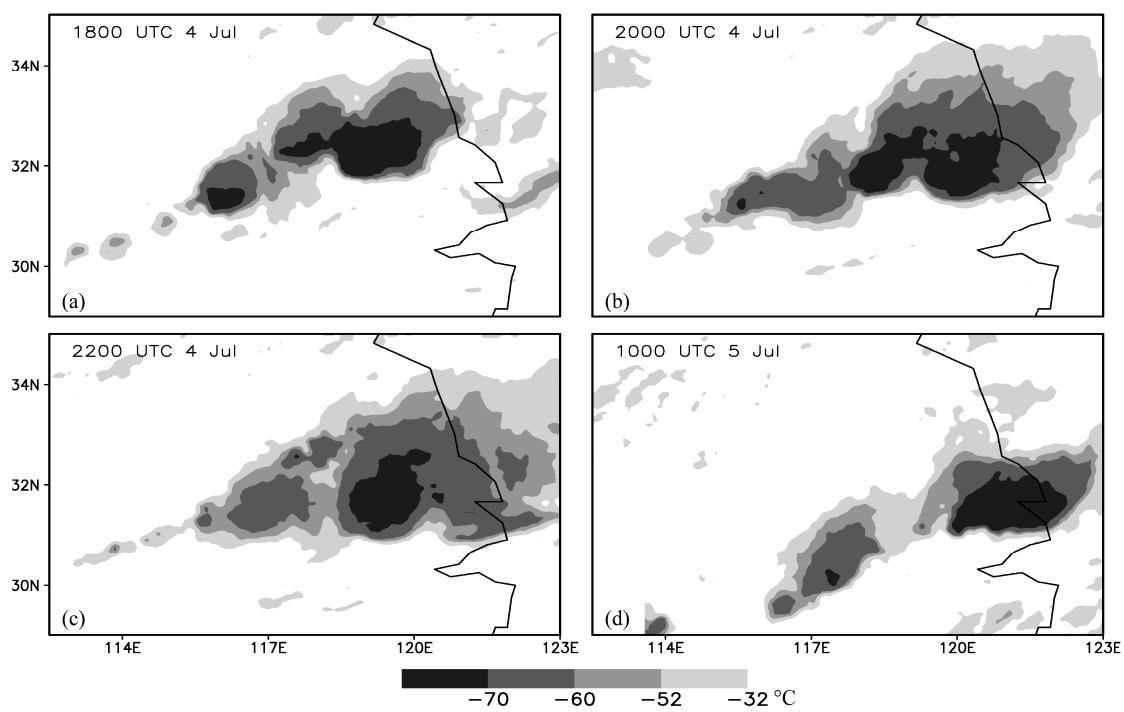


图 2 2003 年 7 月 4~5 日的 GMS 红外卫星云图: (a) 4 日 18:00; (b) 4 日 20:00; (c) 4 日 22:00; (d) 5 日 10:00

Fig. 2 The infrared satellites images from GMS from 4 Jul to 5 Jul 2003: (a) 1800 UTC 4 Jul 2003; (b) 2000 UTC 4 Jul 2003; (c) 2200 UTC 4 Jul 2003; (d) 1000 UTC 5 Jul 2003

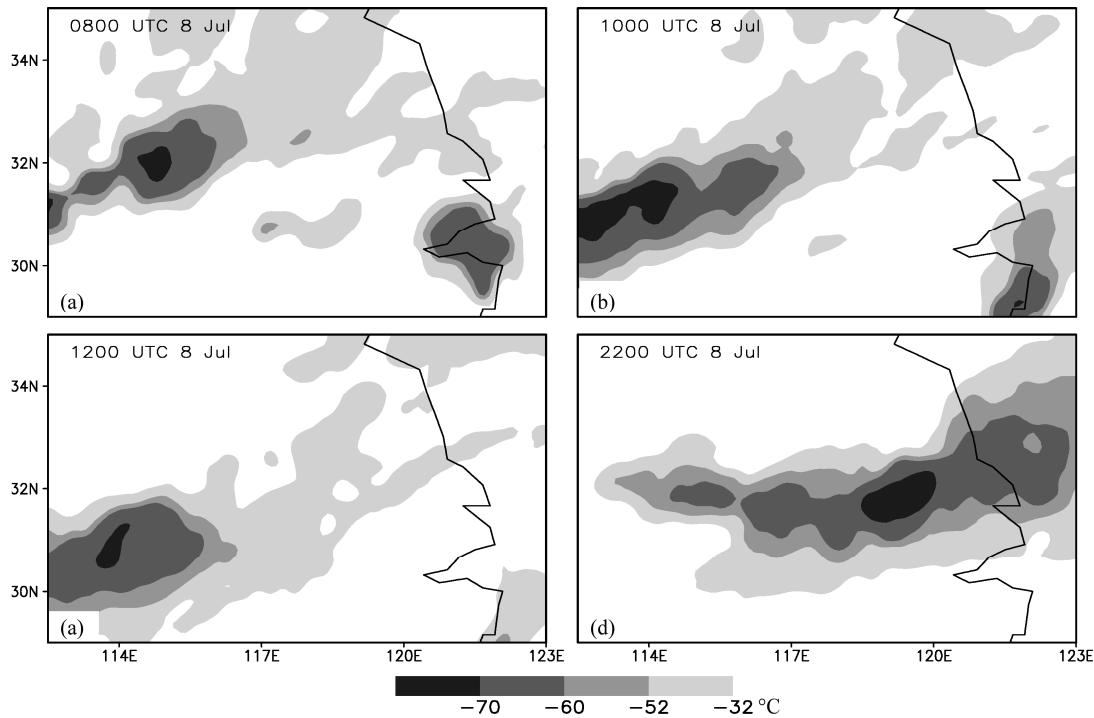


图 3 2007 年 7 月 8 日的 GOES-9 红外卫星云图: (a) 08:00; (b) 10:00; (c) 12:00; (d) 22:00

Fig. 3 The infrared satellite images from GOES-9 for 8 Jul 2007: (a) 0800 UTC; (b) 1000 UTC; (c) 1200 UTC; (d) 2200 UTC

et al. (2000) 研究的个例类似, MCV 形成后, 引发的第二次对流活动在东部地区发展并逐渐加强。

下面将通过数值模拟研究来分析 MCV 的结构特征和演变机理。

3 数值模式和模拟方案

3.1 中尺度模式简介

ARPS (Advanced Regional Prediction System)

的资料分析系统(ADAS)是一个能同化常规和一些非常规资料的中尺度分析系统。ADAS 包含微物理调整系统和复杂云分析系统, 其中复杂云分析系统是基于局地分析和预报系统(local analysis and prediction system)的云分析方案构造的(Zhang, 1999), 它可以利用多普勒雷达资料、卫星资料及地面云观测资料进行三维云分析, 构建一个具有高分辨率的三维初始水汽和云水场, 再通过基于湿绝热或非绝热初始化的方法对温、湿量和风分量等进行调整, 使得雷达观测信息在初始场形成中得到应用, 从而改进初始场。

WRF 模式为非静力模式, 但也提供静力框架的选择, 水平方向采用 Arakawa C 网格, 垂直方向为质量追随坐标(mass-based terrain following coordinate), 其分辨率可随高度变化。若采用时间分裂方案, 声波和重力波采用小步长, 可使用 Runge-Kutta 3 阶或 2 阶方案。若采用平流方案, 可选择从 2~6 阶的方案。此外, WRF 还提供单向和双向嵌套, 嵌套区域可移动, 包含的物理过程有辐射、边界层参数化、对流参数化、次网格湍流扩散以及微物理等, 适合高分辨率的数值模拟。

3.2 试验方案

本研究中 WRF 模式的模拟采用三重单向嵌套网格, 区域一格距为 36 km, 中心位置为 (31.0°N, 112.0°E); 区域二和区域三的格距分别为 12 km 和 4 km, 中心位置均为 (31.9°N, 117.3°E); 垂直方向分为 31 层。微物理过程均为 WSM6 阶数方案, 其中区域一和区域二同时采用 Kain-Fritsch 积云参数化方案和微物理方案, 区域三仅采用微物理方案; 边界层采用 YSU 方案, 陆面过程采用 Noah 陆面模式, 辐射采用 Dudhia 方案。模式积分初始时刻分别为 2003 年 7 月 4 日 12:00 和 2007 年 7 月 8 日 00:00, 均积分 24 h。

针对两个个例设计了 4 组试验, 试验中背景场均采用美国国家环境预报中心(NCEP)的 1°(纬度)×1°(经度)再分析资料, 然后, 利用 ADAS 及复杂云分析方案对常规资料和雷达资料的分析结果形成初始场。在对照试验 CNTL 中, 只加入常规地面观测、探空资料; 试验 RADAR-V 同化常规地面观测、探空资料和多普勒雷达径向风资料; 试验 RADAR-R 同化常规地面、探空资料和雷达反射率资料; 试验 RADAR-RV 同化常规地面、探空资料和雷达径向风、反射率资料。有关试验结果的分

析和验证可参考文献徐广阔等(2009a, 2009b), 结果表明, 对 2 个 MCV 个例的试验都是 RADAR-V 的模拟结果与降水、涡旋发生发展过程的实况最相近, 因此, 本文中对 2 个 MCV 的分析都采用 RADAR-V 试验的模拟结果。

4 MCV 的发展过程和结构的演变特征

4.1 MCV 的发生发展过程

孙建华等(2006)对 2003 年 7 月 3~5 日江淮降雨过程有详细的分析, 这里只讨论 MCV 的发展和结构。4 日 17:00 至 18:00 700 hPa 流场上在 (33.2°N, 117°E) 附近有闭合环流中心(图略), 4 日 19:00(图 4), 闭合环流中心已逐渐消失, 在涡旋中心的东南侧有较强对流发生。21:00 至 22:00, 有一个新的闭合气旋环流中心出现, 位于 (33°N, 119°E) 附近, 即原来对流发生的位置, ND-MCV 形成, ND-MCV 生成的时间与实况基本一致。4 日 23:00 至 5 日 02:00 涡旋环流不断发展, 5 日 03:00 之后, 对流层中层闭合气旋性环流逐渐消失, 中尺度对流涡旋消散。2003 年 7 月 4 日 12:00 至 5 日 12:00 每 6 h 降水模拟结果和实况较为接近(图略)。4 日 18:00 至 5 日 00:00, 6 h 降水量明显增强, 强降水中心范围增大, 降水达 90 mm, 这也从一个方面说明了中尺度对流系统(MCS)的发展及其降水的增强与 MCV 产生均有着密切的关系。

根据 ND-MCV 的发展过程, 因为系统移动较慢, 选取涡旋发展最强时, 以 MCV 涡旋中心为中心点大约 500 km 的范围, 即采用 MCV 区域 (31°N~35°N, 116°E~121°E) 的平均涡度来反映涡旋的强度, 图 5 是 2003 年 7 月 4 日 19:00 至 5 日 04:00 每隔 1 h ND-MCV 的涡度廓线垂直分布, 4 日 19:00 至 23:00, 对流层中低层涡度逐渐增强, 最大值出现在大约 700 hPa, 最强时大约为 $10.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 达到强盛期, 5 日 00:00 至 01:00 仍然维持了较大的正涡度, 02:00 以后, 700 hPa 以下的涡度逐渐减小, ND-MCV 进入减弱期, 但从散度场的演变看(图略), 低层的辐合在 5 日 00:00 以后就转为辐散, 只在中层维持弱的辐散, 且高层的强辐散也只维持到 5 日 00:00, 这表明辐散项可能为涡度的主要制造项, 低层辐合和高层辐散的减弱是 MCV 减弱的主要原因。根据涡度和环流的演变将 4 日 23:00 之前定义为 MCV 的发展期、4 日 23:00 至 5 日 01:00

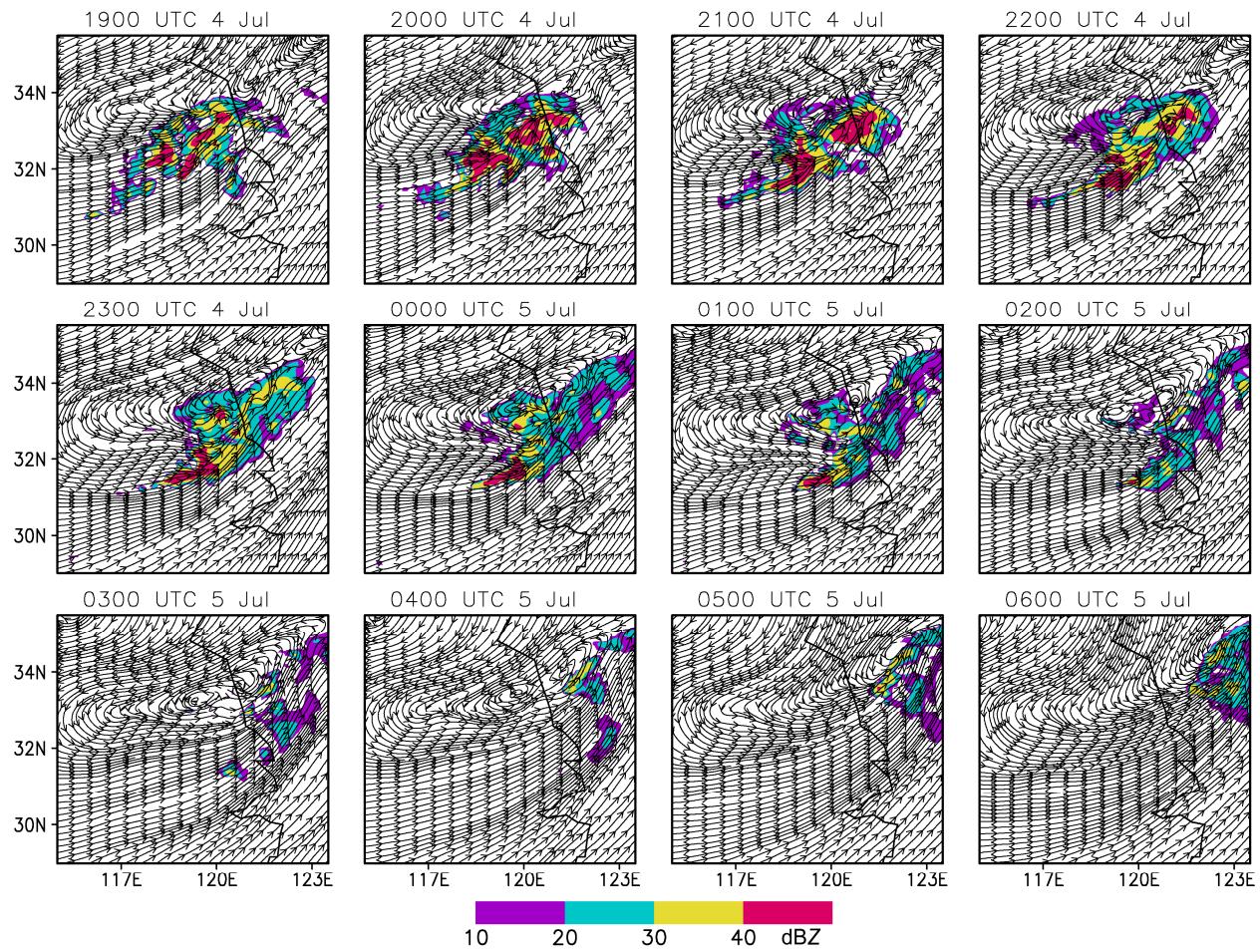


图 4 模拟的 2003 年 7 月 4 日 19:00 至 5 日 06:00 700 hPa 流场和雷达反射率 (填色)

Fig. 4 The simulated streamline fields and radar reflectivity (colour) at 700 hPa from 1900 UTC 4 to 0600 UTC 5 Jul 2003

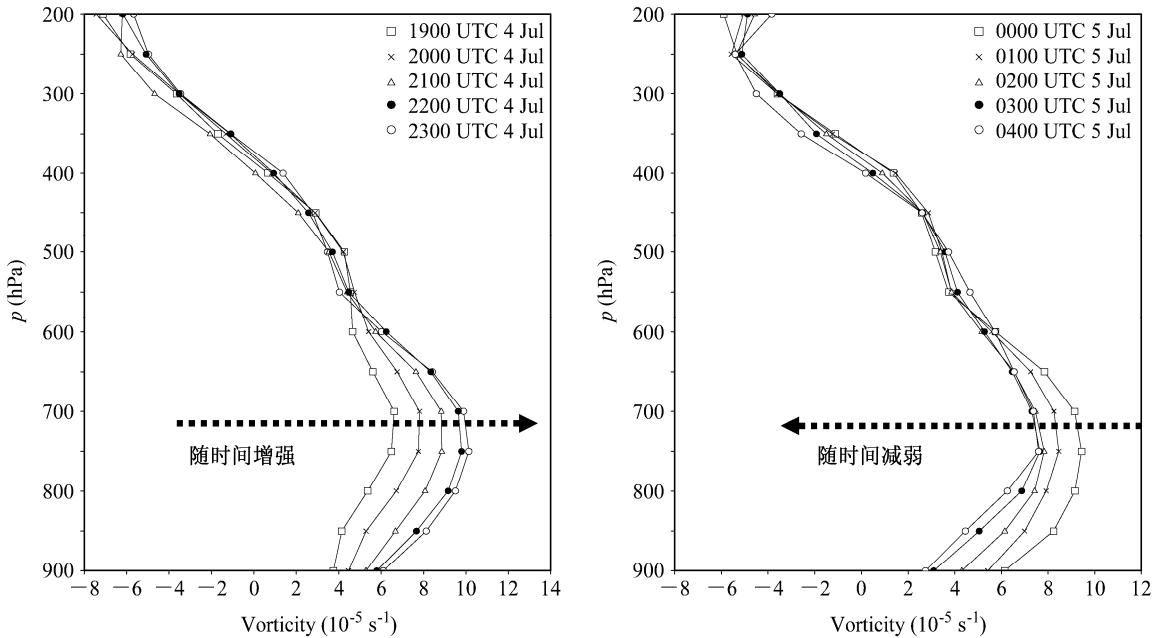


图 5 2003 年 7 月 4 日 19:00 至 5 日 04:00 ND-MCV 涡度廓线 ($31^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$) 区域平均垂直分布

Fig. 5 The vertical distribution of the averaged vorticity of ND-MCV (non-developing mesoscale convective vortex) ($31^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$) from 1900 UTC 4 to 0400 UTC 5 Jul 2003

为 MCV 的强盛期，有明显的闭合环流存在，并有较强的正涡度，其东南部维持了较强的对流。5 日 02:00 以后，MCV 进入减弱期，雷达回波也随之减弱。

图 6 是模拟的 D-MCV 每隔 1 h 的 700 hPa 风场和雷达反射率，图 7 是 D-MCV 涡度廓线的演变特征。2007 年 7 月 8 日 11:00 至 14:00 UTC，新的闭合气旋环流出现，但其涡度中心的强度较弱，D-MCV 正处于形成期，涡旋中心的西南部有较强的对流发生（图 6）。8 日 15:00，闭合环流持续发展，其西南部对流增强，并一直维持到 8 日 20:00。结合 D-MCV 涡度廓线的演变（图 7），8 日 11:00 至 14:00 涡度廓线的极大值是随着时间增大的，500 hPa 高度以下为正涡度区，涡度最大值位于约 700~650 hPa 之间，MCV 处于发展阶段。8 日 15:00，700 hPa 高度上的正涡度已经达到了 $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，D-MCV 已经进入了发展的强盛期。8 日 16:00 至 20:00 UTC 低层正涡度继续增大，最大值出现在 700 hPa，大

约为 $8.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。8 日 21:00，正涡度极大值开始随时间减小，闭合环流消散，其西南部对流明显减弱，MCV 进入了减弱期。从散度场的演变看（图略），D-MCV 在 8 日 15:00 后辐散层从中层向低层发展，与低涡的发展对应，21:00 后辐散层只存在于 800 hPa 以下，并迅速减弱，对应了涡旋的减弱。

D-MCV 发展过程中，8 日 00:00 至 06:00 的 6 h 降雨中心位于 $(33^\circ\text{N}, 117^\circ\text{E})$ 附近，降水强度达 50 mm 以上，但在 D-MCV 母对流系统发展的区域 $(112^\circ\text{E} \sim 116^\circ\text{E})$ 之间，6 h 降水强度较弱（图 8）。8 日 06:00 至 12:00，该区域降水增强，形成这次暴雨过程中的第二个降水中心，对应 D-MCV 的形成时期，表明降水的增强与 MCV 形成有着密切的关系。8 日 12:00 至 18:00，该区域维持着较强的降水，8 日 18:00 至 9 日 00:00，降水范围向东部地区移动，并且雨强增强，说明 D-MCV 在发展至强盛期后，又引发了第二次对流的发展，造成了降水的增强。

以上的分析表明，ND-MCV 是不发展的，维持

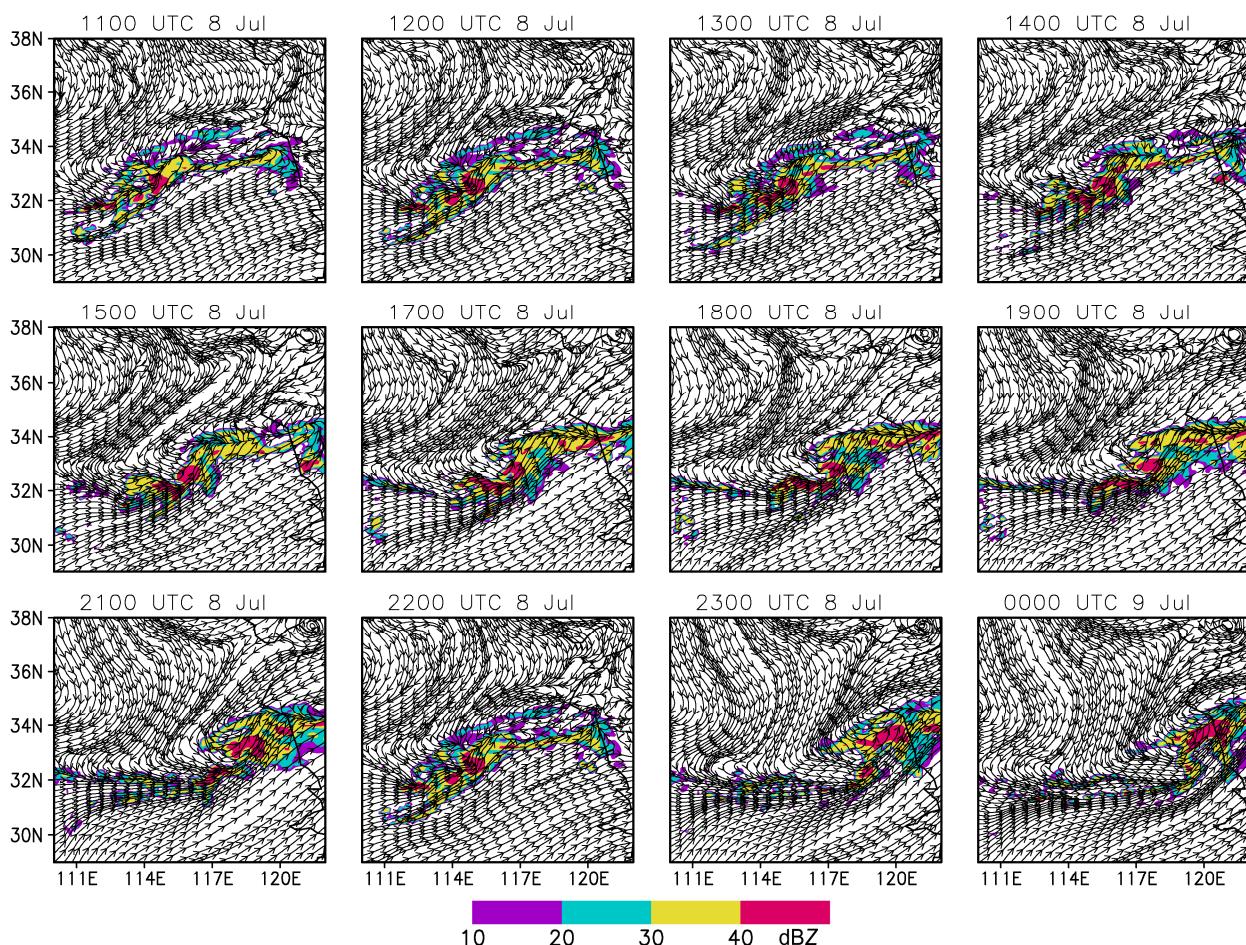


图 6 模拟的 2007 年 7 月 8 日 11:00 至 9 日 00:00 700 hPa 流场和雷达反射率（填色）

Fig. 6 The simulated streamline fields and radar reflectivity (colour) at 700 hPa from 1100 UTC 8 to 0000 UTC 9 Jul 2007

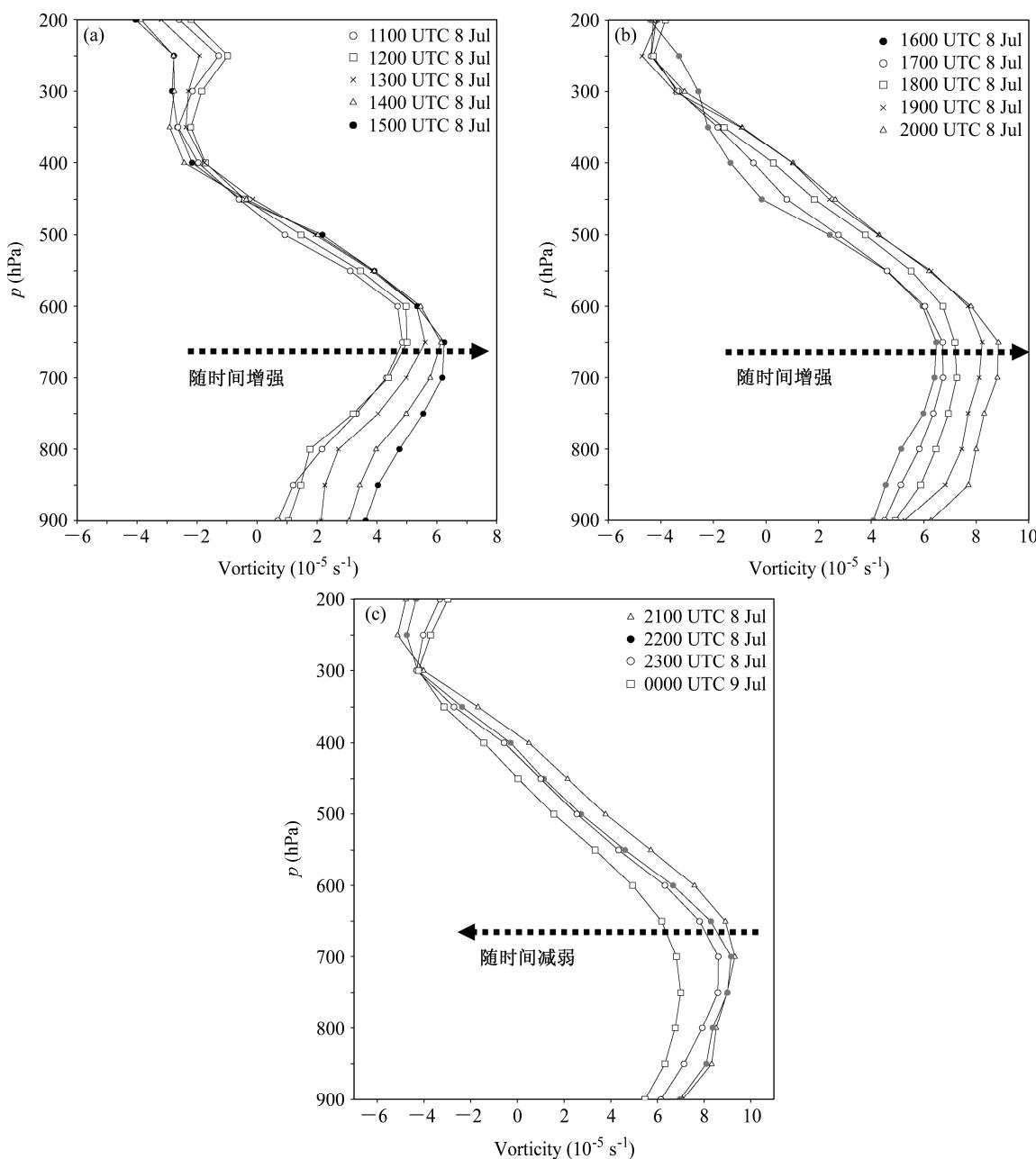
图 7 2007 年 7 月 8 日 00:00 至 9 日 00:00 D-MCV 的涡度廓线 ($32^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E} \sim 119^{\circ}\text{E}$) 区域平均垂直分布

Fig. 7 The vertical distribution of the averaged vorticity of D-MCV (developing-mesoscale convective vortex) ($32^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E} \sim 119^{\circ}\text{E}$) from 0000 UTC 8 to 0000 UTC 9 Jul 2007

时间较短, 而 D-MCV 是发展的, 维持时间较长。ND-MCV 发展过程中 400 hPa 以下为正涡度, 涡度始终在 750 hPa 达到最大值, 说明涡旋在发生发展过程中最强一直在 750 hPa, 向上和向下逐渐减弱, 600 hPa 以上在涡旋的整个生命史中涡度都没有明显的变化, 但在涡旋发展过程中对流层下层涡度增加和减少的幅度与对流层中层相似。D-MCV 涡度廓线的演变基本与 ND-MCV 类似, 但其涡度最强中心在 650 hPa, 与 ND-MCV 对比, D-MCV 最强

的层次要高一些, 并且对流层高层 (600 hPa 以上) 在其发展过程中也有涡度增加, 中低层的辐合维持时间也较长, 再加上二次对流的显著发展, 可能是 D-MCV 维持时间较长的原因。

4.2 MCV 发生发展过程的结构特征

前面对 ND-MCV 和 D-MCV 的 700 hPa 流场和涡度垂直分布廓线的分析表明, MCV 在对流层中层最强, 那么在其它层次 MCV 的流场分布如何呢? 通过对 ND-MCV 各个层次的流场分析发现(图

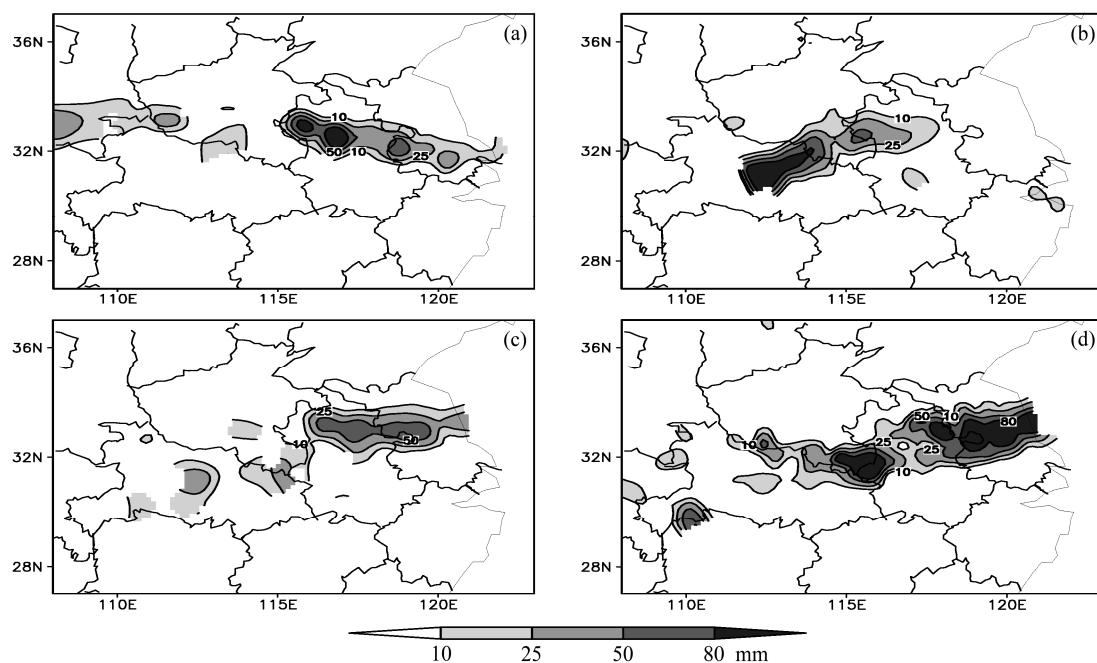


图 8 2007 年 7 月 8 日的 6 h 累计观测降水量: (a) 8 日 00:00 至 06:00; (b) 8 日 06:00 至 12:00; (c) 8 日 12:00 至 18:00; (d) 8 日 18:00 至 9 日 00:00
Fig. 8 The accumulated observed 6-h precipitation: (a) 0000 UTC to 0600 UTC 8 Jul 2007; (b) 0600 UTC to 1200 UTC 8 Jul 2007; (c) 1200 UTC to 1800 UTC 8 Jul 2007; (d) 1800 UTC 8 to 0000 UTC 9 Jul 2007

9), 闭合的涡旋环流只在 850~600 hPa 存在, 闭合环流 4 日 23:00 出现在 850 hPa 和 600 hPa, 比在 700 hPa 出现的时间晚了 2 h, 而且强度和范围也要比 700 hPa 的涡旋弱。500 hPa 上 MCV 的位置为一弱槽。对流层高层 200 hPa 为强的辐散气流。ND-MCV 的闭合涡旋环流首先出现在 700 hPa, 然后逐渐向上和向下发展。D-MCV 环流的垂直分布与 ND-MCV 基本相似(图略)。下面分析 ND-MCV 和 D-MCV 发生发展过程中不同阶段的垂直结构特征。

4.2.1 MCV 发展阶段的特征

ND-MCV 的发展阶段为 2003 年 7 月 4 日 19:00 至 22:00。4 日 19:00, 沿 31.5°N 的正涡度柱从对流层低层一直伸展到上层, 为深厚的对流区, 而 32.5°N 的正涡度中心位于 MCV 中心的对流层中层, 此时, 强对流位于 MCV 中心的南部, MCV 中心的对流层中层有对流系统活动(图 10a), MCV 中心附近假相当位温在对流层中下层的垂直分布表明层结为中性(图 11a)。4 日 21:00, 沿 31.5°N 和 32.5°N 的剖面仍分别有 2 个正涡度中心, 第 1 个中心仍发展到对流层上层, 该中心对应的对流系统的雷达反射率强度可达到 40 dBZ(图 10b)。强对流区为高的假相当位温(θ_{se})和中性层结(图 11b), ND-MCV

的中心在正涡度中心和强回波区的北侧, 但此时 MCV 的中心区域为上升运动。

与 ND-MCV 对比(2003 年 7 月 4~5 日个例), D-MCV(2007 年 7 月 8~9 日个例)的发展阶段(2007 年 7 月 8 日 11:00 至 14:00) 涡旋中心的正涡度和对流都不强, 其强对流主要在涡旋的南侧(图 12a、12b、13a、13b), MCV 的中心区为层状云区。

4.2.2 MCV 成熟阶段的特征

ND-MCV 的成熟阶段为 2003 年 7 月 4 日 23:00 至 5 日 01:00。4 日 23:00 随着闭合环流的出现(图 4), 正涡度中心和强回波中心比 21:00 有所减弱, 但是 ND-MCV 的中心区域仍为上升运动(图 10c、11c)。5 日 01:00 UTC, 正涡度中心和强回波中心位于 ND-MCV 中心的南侧, 且正涡度中心距离 ND-MCV 的中心较远(图 10d、11d)。此时, ND-MCV 的中心已经出现下沉运动, MCV 区域的对流相对于发展期已经减弱。

与 ND-MCV 对比, D-MCV 的成熟阶段(2007 年 7 月 8 日 15:00 至 20:00), 涡旋中心为较强的下沉运动(图 12c、12d), 中性层结区的范围没有 ND-MCV 大, 而且在这个阶段其南侧的对流非常强(图 13c、13d), 对流的范围也比 ND-MCV 大(图

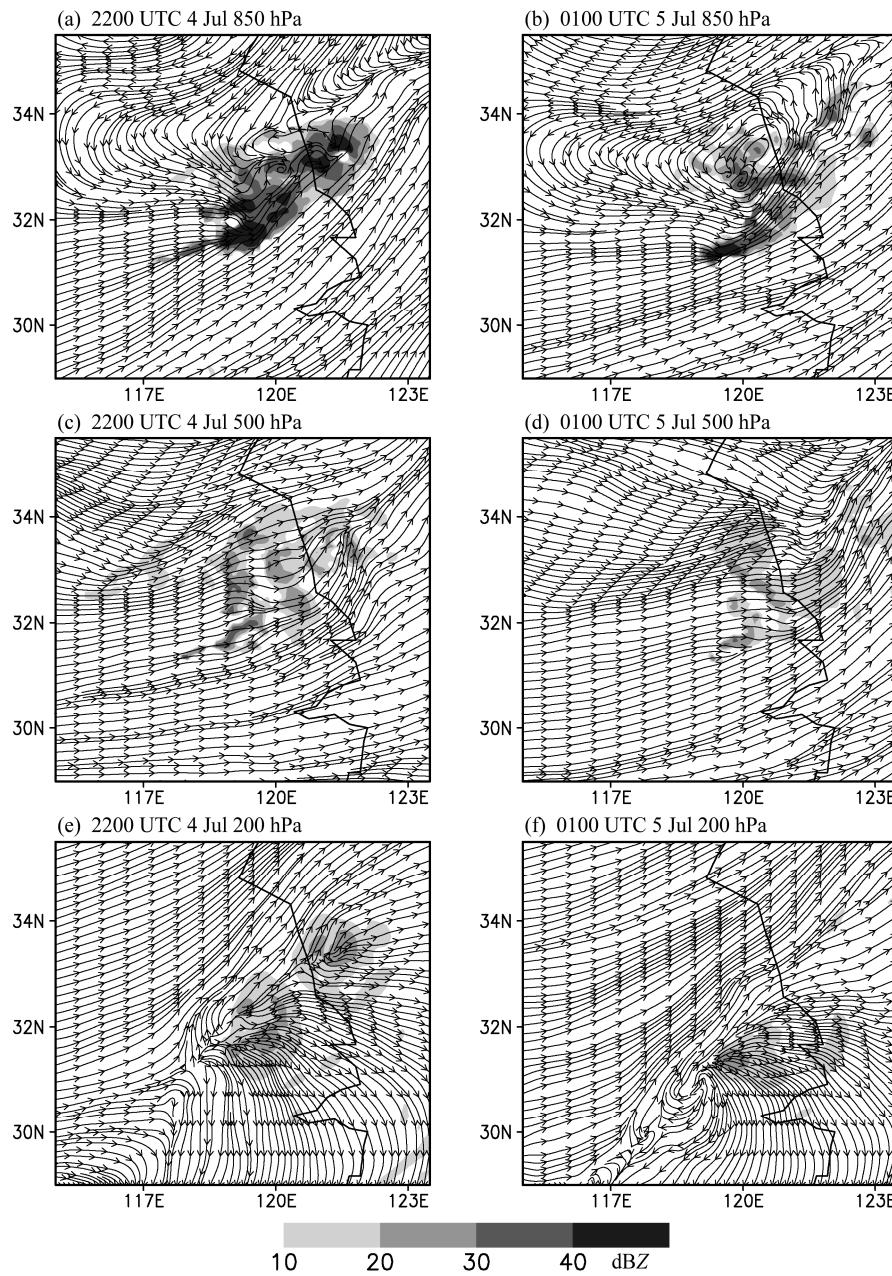


图 9 2003 年 7 月 4 日 22:00 (左列) 和 5 日 01:00 (右列) 不同高度的流场和雷达反射率 (阴影): (a, b) 850 hPa; (c, d) 500 hPa; (e, f) 200 hPa

Fig. 9 The streamline fields at different levels and retrieval radar reflectivity (shaded) at 2200 UTC 4 Jul 2003 (left panel) and 0100 UTC 5 Jul 2003 (right panel): (a, b) 850 hPa; (c, d) 500 hPa; (e, f) 200 hPa

略)。对流的范围大和强度强使 D-MCV 的潜热释放大于 ND-MCV, 可能是导致 D-MCV 是一个发展型涡旋的原因之一, 而 ND-MCV 是一个不发展型涡旋。

4.2.3 MCV 减弱阶段的特征

ND-MCV 的减弱阶段为 2003 年 7 月 5 日 02:00 至 06:00。5 日 03:00, ND-MCV 中心附近区域的对流和上升运动已经完全消失了, 此时对流只发生在

ND-MCV 的东南部 (图 10e 和图 11e)。5 日 05:00 之后, ND-MCV 开始逐渐减弱, ND-MCV 的东南部对流和上升运动也逐渐减弱 (图 4 和图 10f)。假相当位温在对流层低层随高度增加表明此时, 对流层低层的层结已经转为稳定 (图 11e、11f)。D-MCV 的减弱阶段 (2007 年 7 月 8 日 21:00 至 9 日 00:00), 此阶段虽然闭合的涡旋环流已经消失, 但原涡旋南部有对流区和上升运动 (图 13e、13f), 而在涡旋

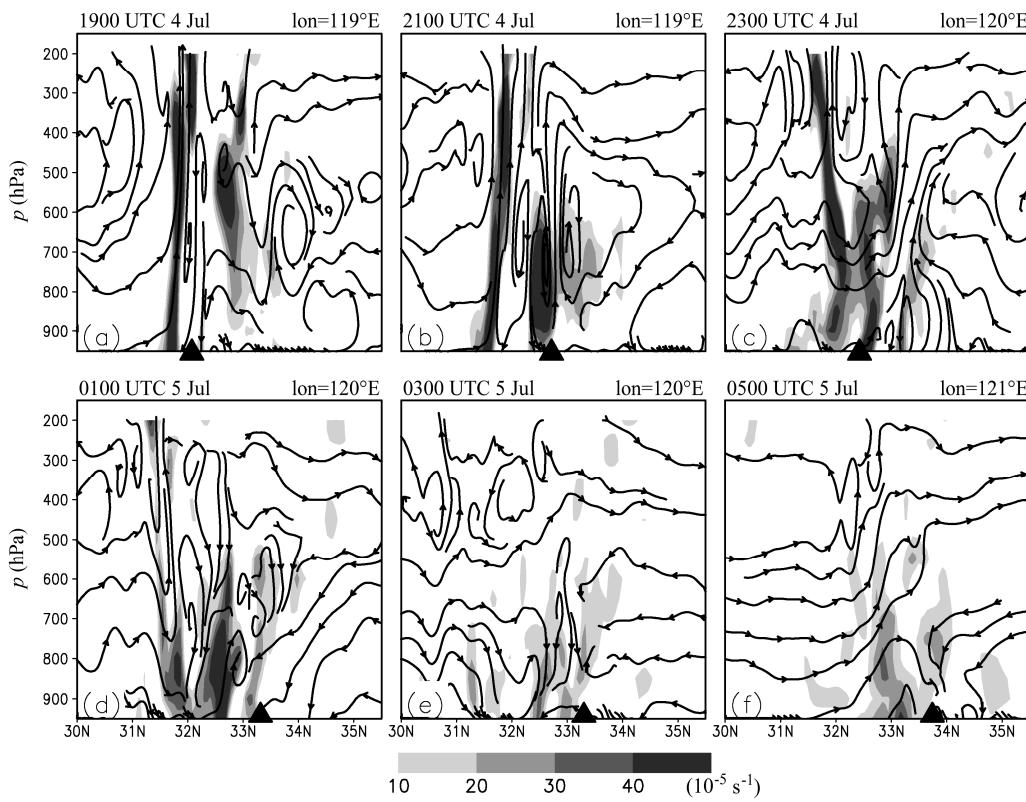


图 10 垂直环流 ($v, w \times 10$, 单位: m s^{-1}) 和涡度 (阴影) 沿 ND-MCV 中心的经向剖面, 小三角形代表 MCV 的中心

Fig. 10 The vertical cross section of circulation ($v, w \times 10$, units: m s^{-1}) and vorticity (shaded) along the center of the ND-MCV, where the triangles represent the center of the MCV

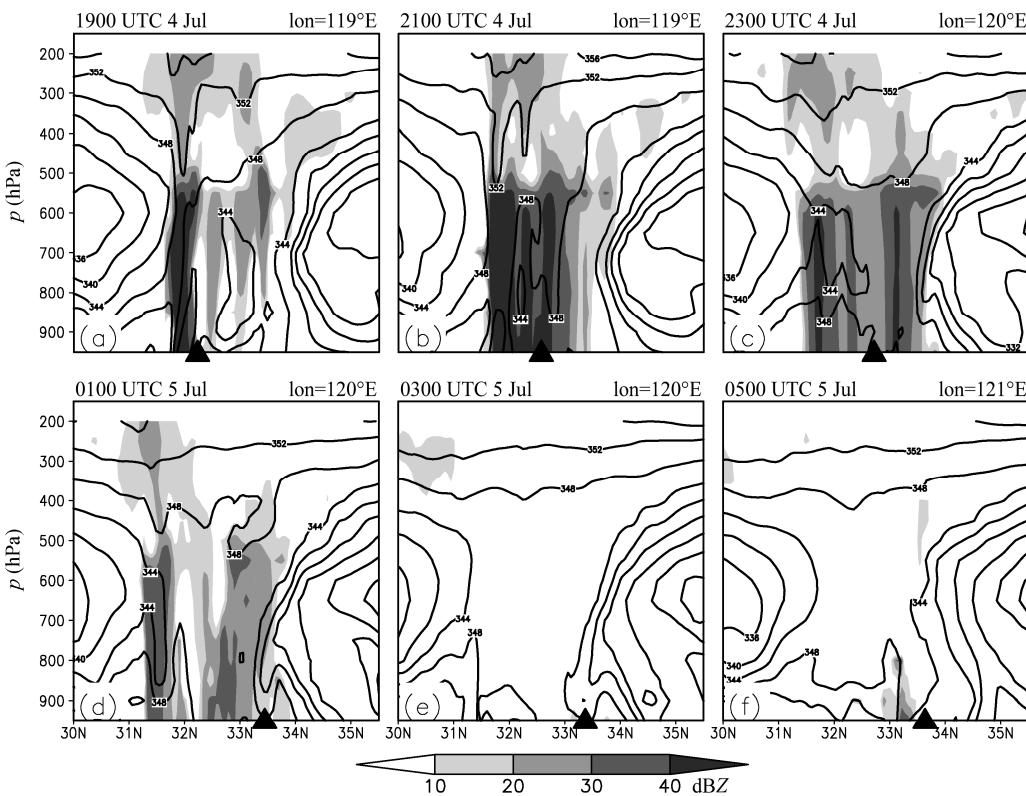


图 11 假相当位温 (实线, 单位: K) 和反演反射率 (阴影) 沿 ND-MCV 中心的经向剖面, 小三角形代表 MCV 的中心

Fig. 11 The vertical cross section of pseudo-potential equivalent temperature (solid line, units: K) and retrieval reflectivity (shaded) along the center of the ND-MCV, where the triangles represent the center of the MCV

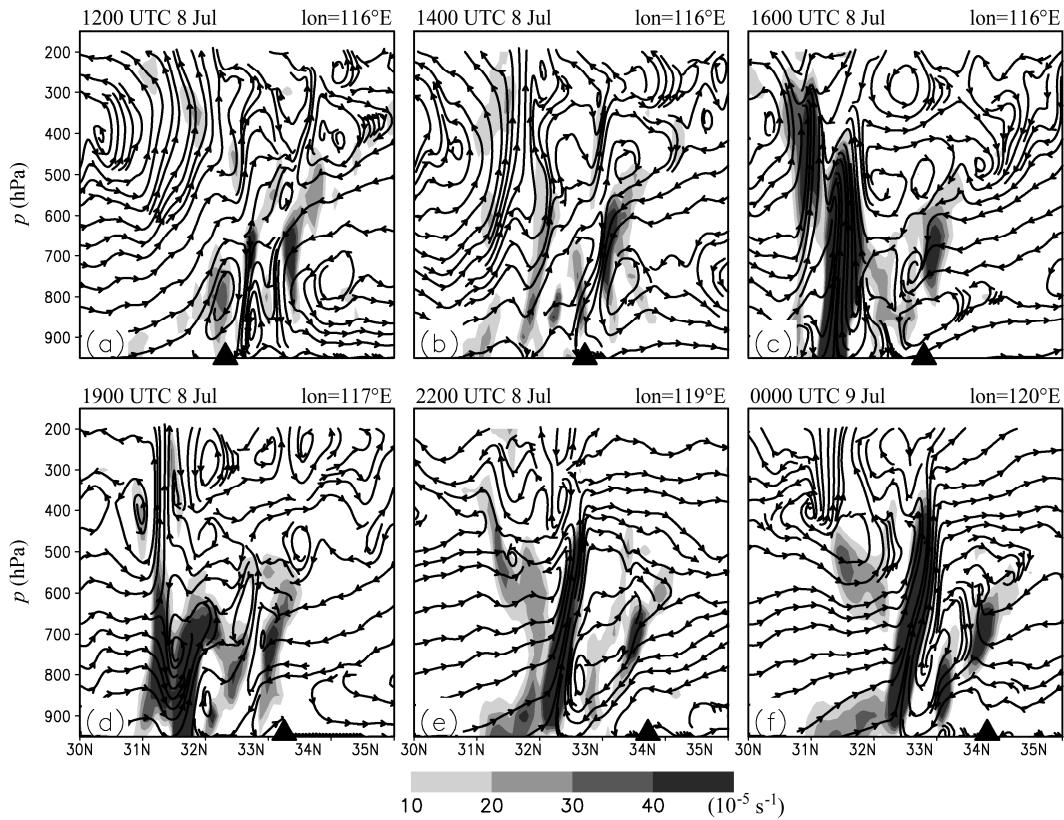


图 12 垂直环流 ($v, w \times 10$, 单位: m s^{-1}) 和涡度 (阴影) 沿 D-MCV 中心的经向剖面, 小三角形代表 MCV 的中心

Fig. 12 The vertical cross section of circulation ($v, w \times 10$, units: m s^{-1}) and vorticity (shaded) along the center of the D-MCV, where the triangles represent the center of the MCV

中心区为下沉运动(图 12e、12f)。

众所周知, 东亚季风区低空急流(LLJ)对水汽输送和对流发展有重要的作用, 图 14 和图 15 分别给出了 ND-MCV 和 D-MCV 发展过程中的风速和对流区的垂直剖面分布。ND-MCV 的发展阶段(2003 年 7 月 4 日 19:00 至 22:00), 低空急流出现在 900~600 hPa, 强度为 15 m s^{-1} , 而最强的回波正好出现在急流中心的北侧(图 14a、14b)。ND-MCV 的成熟阶段(2003 年 4 日 23:00 至 5 日 01:00), ND-MCV 的急流中心强度从 16 m s^{-1} 增加了 20 m s^{-1} , 16 m s^{-1} 的急流已经向上伸到 300 hPa, 新对流又在急流中心北侧发展(图 12c、12d)。ND-MCV 减弱的时期, 5 日 05:00 急流中心的强度依然维持, 5 日 07:00 急流中心开始减弱(图 14e、14f)。D-MCV 发展过程中高空急流出现在涡旋的南北两侧, 而 ND-MCV 主要出现在涡旋的北侧。发展阶段(2007 年 7 月 8 日 11:00 至 14:00 UTC)低空急流出现在 800~500 hPa, 强度为 15 m s^{-1} , 而最强的回波在急流中心的北侧(图 15a、15b), 发展阶

段急流的中心比 ND-MCV 高。D-MCV 的成熟阶段(2007 年 7 月 8 日 15:00 至 20:00,) 的回波强度比发展阶段增强, 急流中心强度从 15 m s^{-1} 增加了 24 m s^{-1} (图 15c、15d)。到了 D-MCV 减弱的时期, 急流中心的强度增强到 30 m s^{-1} (图 15e、15f)。以上分析表明, MCV 发展过程中, 其南侧急流的增强对 MCV 中新对流的触发和维持有一定的作用。

5 结论和讨论

本文首先对 2003、2007 年江淮梅雨期 MCV 的活动特征进行了统计分析, 然后采用模拟结果对比分析了 2 个 MCV 的发展过程和结构特征。研究确认了我国梅雨锋上有 MCV 存在, 这些 MCV 与强降水有关, 尤其是 MCV 诱发新对流的过程, 造成的降水更强, 易引发洪涝灾害。

2003、2007 年江淮流域梅雨期有 9 个 MCV 发生, 大多数 MCV 发生在江苏境内(32°N ~ 35°N 之间), 其中有 2 个在发展过程中移动不明显, 7 个在

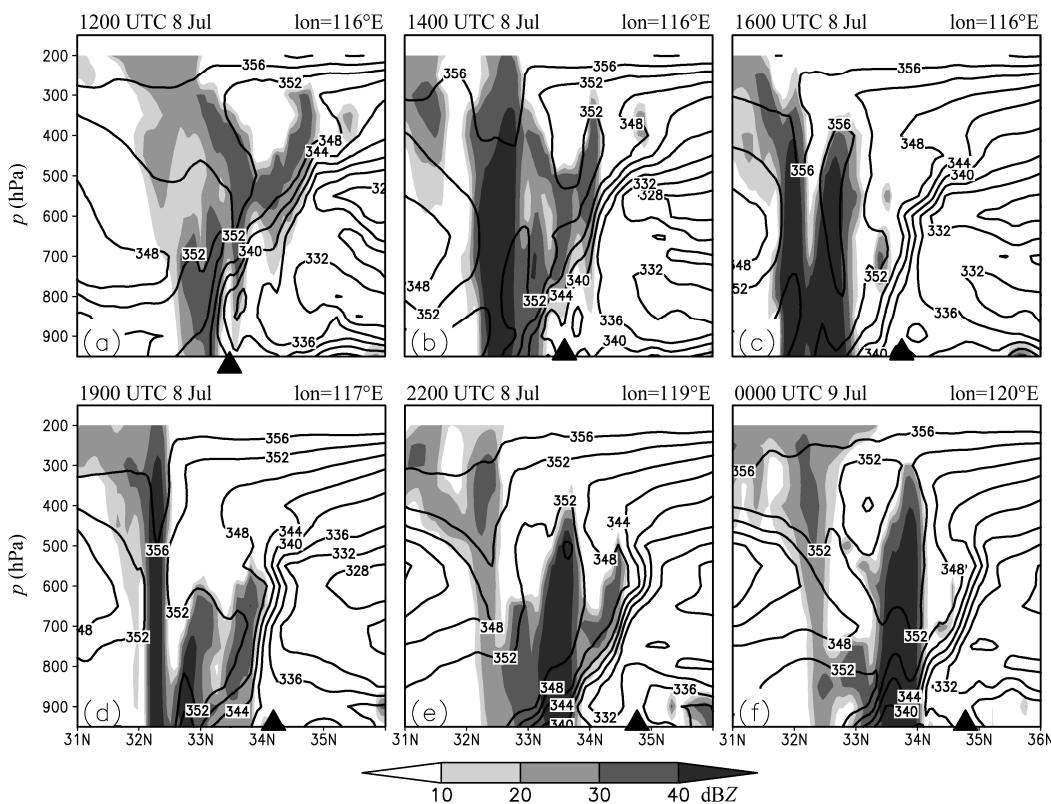


图 13 假相当位温(实线, 单位: K)和反演反射率(阴影)沿 D-MCV 中心的经向剖面, 小三角形代表 MCV 的中心

Fig. 13 The vertical cross section of pseudo-potential equivalent temperature (solid line, units: K) and retrieval reflectivity (shaded) along the center of the D-MCV, where the triangles represent the center of the MCV

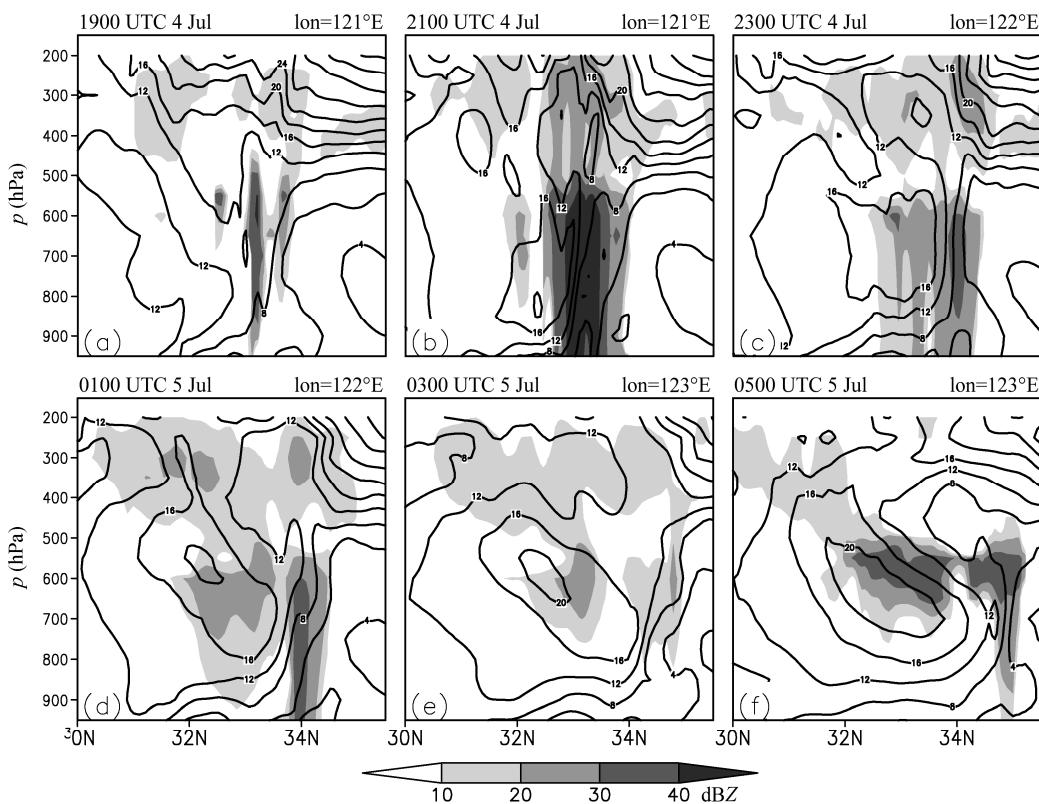


图 14 风速(实线, $>12 \text{ m s}^{-1}$)和反演反射率(阴影)沿 ND-MCV 中心的经向剖面

Fig. 14 The vertical cross section of wind speed (solid line, $>12 \text{ m s}^{-1}$) and retrieval radar reflectivity (shaded) along the center of the ND-MCV

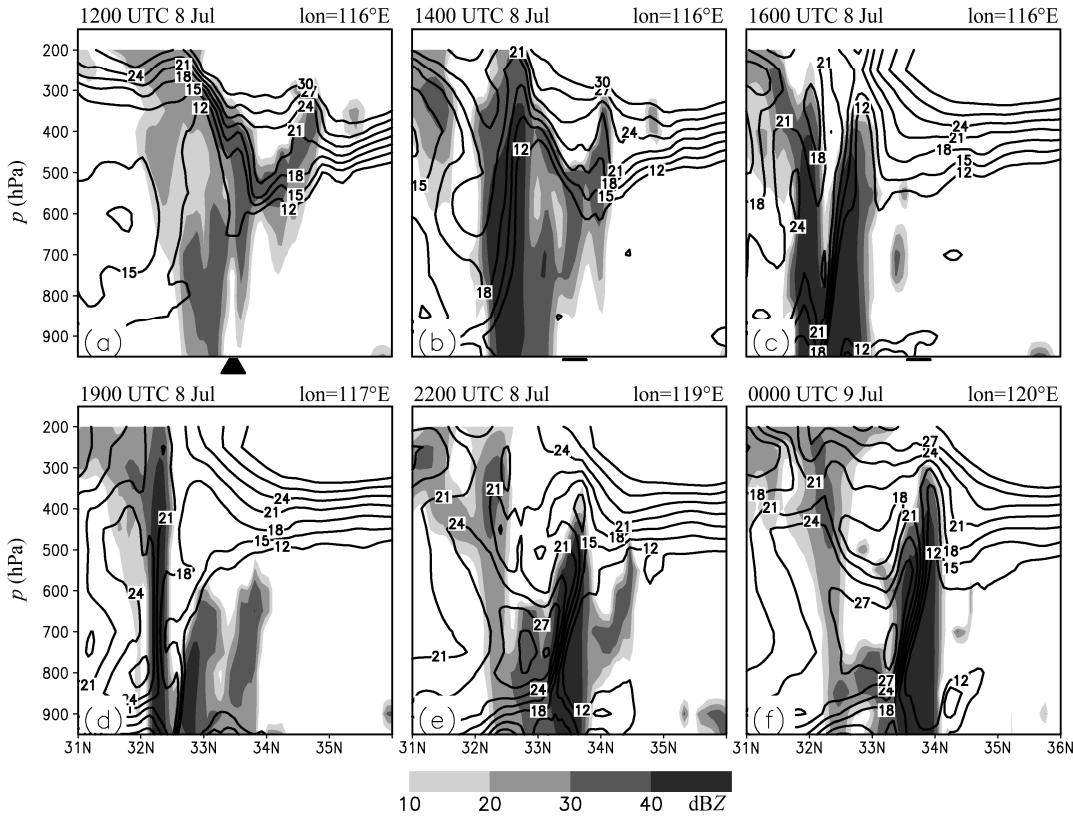


图 15 风速(实线, $>12 \text{ m s}^{-1}$)和反演反射率(阴影)沿 D-MCV 中心的经向剖面

Fig. 15 The vertical cross section of wind speed (solid line, $>12 \text{ m s}^{-1}$) and retrieval radar reflectivity (shaded) along the center of the D-MCV

发展过程中均向东移动, 大多数 MCV 的移动路径都经过了苏北及淮河流域下游地区。数值模拟结果进一步确认了 MCV 是在强的 MCS 发展过程中形成的, 这与 Bartel and Maddox (1991) 的统计结果一致。MCV 的涡旋环流一般在 600 hPa 以下, 对应涡旋区域对流层高层为强辐散, 涡度最强的中心在对流层中层, 但正涡度区可伸展到 300 hPa。

MCV 一般发生在强对流系统的北侧, 初始阶段在 MCV 的中心为中性层结并有上升运动; 而成熟阶段 MCV 的中心基本转为下沉运动, 同时, 其南侧有新的对流(二次对流)发生; 减弱阶段其南侧的对流和上升运动迅速减弱。由于梅雨锋的环境条件有利于对流的发展, 梅雨锋上的 MCV 大多有二次对流发生, 但发展型 MCV 其二次对流会更强。不发展型的 MCV 在发展过程中 400 hPa 以下为正涡度, 在其发生发展过程中最强的层次一直在 750 hPa, 在其整个生命史中 600 hPa 以上的涡度都没有明显的变化。发展型 MCV 的涡度最强中心在 650 hPa, 比不发展型 MCV 伸展的层次要高一些, 而且在其整个生命史中, 600 hPa 以上涡度有明显的变化。涡旋对流层高层有涡度增加以及二次对流的潜

热释放多, 可能是发展型 MCV 维持时间较长的原因。此外, MCV 发展过程中南侧急流的增强对 MCV 中新对流(二次对流)的触发和维持有一定的作用。Davis and Trier (2007) 对 BAMEX 试验期间 5 个典型 MCV 的研究表明, MCV 可以垂直伸展到 5~8 km, 梅雨锋上 MCV 的伸展高度与该研究结果一致。

此外, 有关 MCV 的发展机理, 一些研究认为对流层低层到中层的辐合(Bartels and Maddox, 1991; Olsson and Cotton, 1997; James and Johnson, 2010)、非绝热加热(Clark et al., 2010)以及水平涡度的倾斜项和涡度的垂直输送(Zhang, 1992; Kirk, 2003; Knievel and Johnson 2003)是产生 MCV 的重要因子, 而 Zhang (1992)指出关于 MCV 发生发展的争论可能源于不同的 MCV 性质, Kirk (2003)也指出不同 MCV 的发生发展有不同的动力发展途径。本文只统计了 2 年梅雨期的 MCV 的活动情况, 模拟研究也只针对 2 个个例, 研究结果可能不具有代表性, 因此, 有关梅雨锋上 MCV 统计特征和发展机理仍然需要针对大量个例开展深入研究。

参考文献 (References)

- Adachi S, Kimura F. 2007. A 36-year climatology of surface cyclogenesis in East Asia using high-resolution reanalysis data [J]. SOLA, 3: 113–116.
- Bartels D L, Maddox R A. 1991. Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems [J]. Mon. Wea. Rev., 119: 104–118.
- Brandes E A. 1990. Evolution and structure of the 6–7 May 1985 mesoscale convective system and associated vortex [J]. Mon. Wea. Rev., 118: 109–127.
- Brown J M. 1979. Mesoscale unsaturated downdrafts driven by rainfall evaporation: a numerical study [J]. J. Atmos. Sci., 36: 313–338.
- Chen S S, Frank W M. 1993. A numerical study of the genesis of extratropical convective mesovortices. Part I: Evolution and dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 50: 2401–2426.
- Clark A J, Gallus W A, Xue M, et al. 2010. Convection-allowing and convection-parameterizing ensemble forecasts of a mesoscale convective vortex and associated severe weather environment [J]. Wea. Forecasting, 25: 1052–1081.
- Cram T A, Montgomery M T, Hertenstein R F A. 2002. Early evolution of vertical vorticity in a numerically simulated idealized convective line [J]. J. Atmos. Sci., 59: 2113–2127.
- Davis C A, Trier S B. 2007. Mesoscale convective vortices observed during BAMEX. Part I: Kinematic and thermodynamic structure [J]. Mon. Wea. Rev., 135: 2029–2049.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 253pp.
- Ding Y H. 1993. Study on the Lasting Heavy Rainfalls over the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 253pp.
- 高坤, 徐亚梅. 2001. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究 [J]. 大气科学, 25 (6): 740–756.
- Gao Kun, Xu Yamei. 2001. A simulation study of structure of mesovortices along Meiyu front during 22–30 June 1999 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (6): 740–756.
- James E P, Johnson R H. 2010. A climatology of midlatitude mesoscale convective vortices in the rapid update cycle [J]. Mon. Wea. Rev., 138: 1940–1956.
- 矫梅艳, 姚学祥, 杨克明, 等. 2004. 2003 年淮河大水的成因分析 [M]. 北京: 气象出版社, 212pp.
- Jiao Meiyuan, Yao Xuexiang, Yang Keming, et al. 2004. Analysis on Cause of Formation of Huaihe River Basin Flood in 2003 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 212pp.
- Jorgenson D P, LeMone M A, Trier S B. 1997. Structure and evolution of the 22 February 1993 TOGA COARE squall line: Observation of precipitation, circulation, and surface energy fluxes [J]. J. Atmos. Sci., 54: 1961–1985.
- Kirk J R. 2003. Comparing the dynamical development of two mesoscale convective vortices [J]. Mon. Wea. Rev., 131: 862–890.
- Kirk J R. 2007. A phase-plot method for diagnosing vorticity concentration mechanisms in mesoscale convective vortices [J]. Mon. Wea. Rev., 135: 801–820.
- Knilevel J C, Johnson R H. 2003. A scale-discriminating vorticity budget for a mesoscale vortex in a midlatitude, continental mesoscale convective system [J]. J. Atmos. Sci., 60: 781–794.
- Maddox R A. 1983. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes [J]. Mon. Wea. Rev., 111: 1475–1493.
- Olsson P Q, Cotton W R. 1997. Balanced and unbalanced circulations in a primitive equation simulation of a midlatitude MCC. Part I: Numerical simulation [J]. J. Atmos. Sci., 54: 457–478.
- Skamarock W C, Weisman M L, Klemp J B. 1994. Three-dimensional evolution of simulated long-lived squall lines [J]. J. Atmos. Sci., 51: 2563–2584.
- 石定朴, 朱文琴, 王洪庆, 等. 1996. 中尺度对流系统红外云图云顶黑体温度的分析 [J]. 气象学报, 54 (5): 600–611.
- Shi Dingbu, Zhu Wenqin, Wang Hongqing, et al. 1996. Cloud top blackbody temperature analysis of infrared satellite image for mesoscale convective system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (5): 600–611.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究 [J]. 大气科学, 28 (5): 675–691.
- Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. A study on vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and Study in 2002 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2004, 28 (5): 675–691.
- 孙建华, 周海光, 赵思雄. 2006. 2003 年 7 月 4–5 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): 1103–1118.
- 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): 1103–1118.
- Trier S B, Davis C A, Tuttle J D. 2000. Long-lived mesoconvective vortices and their environment. Part I: Observations from the central United States during the 1998 warm season [J]. Mon. Wea. Rev., 128: 3376–3395.
- Verlinde J, Cotton W R. 1990. A mesovortex couplet in the trailing anvil region of a multi-cellular convective complex [J]. Mon. Wea. Rev., 118: 993–1010.
- Weisman M L, Davis C A. 1998. Mechanisms for the generation of mesoscale vortices within quasi-linear convective systems [J]. J. Atmos. Sci., 55: 2603–2622.
- 徐广阔, 孙建华, 雷霆, 等. 2009a. 多普勒天气雷达资料同化对暴雨模拟的影响 [J]. 应用气象学报, 20 (1): 36–46.
- Xu Guangkuo, Sun Jianhua, Lei Ting, et al. 2009a. Impacts of Chinese Doppler radar on the severe heavy rainfall forecast during Meiyu season [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 20 (1): 36–46.
- 徐广阔, 孙建华, 赵思雄. 2009b. 基于雷达资料同化的 2003 年 7 月一次暴雨过程的数值模拟分析 [J]. 热带气象学报, 25 (4): 427–434.
- Xu Guangkuo, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2009b. The numerical simulation and analysis of a heavy rainfall in July 2003 based on radar data assimilation [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (4): 427–434.
- Yu C K, Jou B J D, Smull B F. 1999. Formative stage of a long-lived mesoscale vortex observed by airborne Doppler radar [J]. Mon. Wea. Rev., 127: 838–857.
- Zhang D L. 1992. The formation of a cooling-induced mesovortex in the trailing stratiform region of a midlatitude squall line [J]. Mon. Wea. Rev.,

- 120: 2763–2785.
- Zhang D L, Fritsch J M. 1987. Numerical simulation of the meso-beta-scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part II: Inertially stable warm-core vortex and the mesoscale convective complex [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 2593–2612.
- Zhang D L, Fritsch J M. 1988. A numerical investigation of a convectively generated, inertially stable, extratropical, warm-core mesovortex overland. Part I: Structure and evolution [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116: 2660–2687.
- Zhang J. 1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observation [D]. Ph. D. dissertation, University of Oklahoma, Available from School of Meteorology, University of Oklahoma, Norman OK 73019, 194pp.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究——2003年 [M]. 北京: 气象出版社, 170pp. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. 2004. The Mechanism of Abnormal Weather and Climate in China—2003 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 170pp.
- 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨 [J]. 大气科学, 28 (2): 187–205. Zhang Xiaoling, Tao Siyan, Zhang Shunli. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with Meiyu front [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (2): 187–205.
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征分析[J]. 气候与环境研究, 12: 713–727. Zhao Sixiong, Zhang Lisheng, Sun Jianhua. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems causing severe flood in Huaihe River basin during the summer of 2007 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12: 713–727.
- 朱爱军, 潘益农. 2007. 中国东部地区一个中尺度对流涡旋的涡度收支分析 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 43: 260–269. Zhu Aijun, Pan Yinong. 2007. A vorticity budget for a mesoscale convective vortex over east China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 43: 260–269.