

黄河中游一次 MCC 致洪暴雨综合诊断分析

井 宇¹ 井 喜² 王 瑞³ 屠妮妮⁴ 余 兴⁵ 杨 新⁵

(1. 辽宁省气象局, 沈阳 110016; 2. 陕西省榆林市气象局; 3. 陕西省延安市气象局;
4. 中国气象局成都高原气象研究所; 5. 陕西省气象科学研究所)

提 要: 为了提高对 MCC 致洪暴雨的预报和预警能力, 利用卫星云图、MICAPS 系统提供的资料以及多普勒雷达资料, 对 2006 年 7 月 2 日黄河中游发生的一次中尺度对流复合体(MCC)和黄河中游暴雨天气过程进行了大尺度环境场和物理量的诊断分析以及三维流场结构分析。结果表明: MCC 是造成暴雨的直接影响系统; 对流层中低层深厚暖湿切变辐合的形成, 配合对流层高层急流分支出口处生成中- α 尺度强辐散、对流层低层华北冷空气南下倒灌锋产生的动力抬升作用, 形成有利于 MCC 生成发展的环流背景; MCC 发生在高能、弱对流不稳定区; 700hPa 西南低空急流、850hPa 分支南风气流为 MCC 的生成发展提供了充足的水汽和能量; 涡度场和散度场的耦合、强烈上升运动的形成, 成为 MCC 发生发展和维持的动力机制; 多普勒雷达径向速度场显示, 东南低空急流、配合西南低空急流的生成和稳定, 西南低空急流左侧有气旋性辐合的维持、配合对流层中高层径向强辐散, 构成 MCC 致洪暴雨的三维流场结构。

关键词: 暴雨 MCC 低空急流

The Synthetic Diagnostic Analysis of a Rainstorm-causing MCC on Middle Yellow River

Jing Yu¹ Jing Xi² Wang Rui³ Tu Nini⁴ Yu Xing⁵ Yang xin⁵

(1. Liaoning Provincial Meteorological Bureau, Shenyang 110016; 2. Yulin Meteorological Office of Shaanxi Province; 3. Yanan Meteorological Office of Shaanxi Province;
4. Chengdu Plateau Meteorological Institute of China Meteorological Administration;
5. Shaanxi Provincial Institute of Meteorology)

Abstract: In order to improve the capability of forecasting and warning of rainstorm-causing MCC, the diagnostic analysis was made on the synoptic cause and the 3-dimensional flow struc-

基金项目: 国家自然科学基金项目(40675058)资助

收稿日期: 2007 年 5 月 14 日; 修定稿日期: 2008 年 1 月 11 日

ture of MCC on 2 July 2006 on the Middle Yellow River by using the satellite image, MICAPS and NCEP and Doppler radar data. The result shows that the MCC was the direct influence system, the formation of warm and wet shear convergence in the middle-low level, the α -scale divergence in the higher level, and the lifting force from low level caused by the cold air mass frontogenesis, all these circulation background are favorable to the MCC. The MCC occurred on high energy and weak convective instability zone, where the southwest jet on 700hPa and south flow on 850 hPa provide plenty of water vapor and energy for MCC. The coupling of divergence field and vorticity field and the formation of updraft is the driving mechanism of MCC. The velocity images of Doppler radar show that the low southeast jet develops and maintains, the low jet to flow into the convergence line maintains and the bow-like α -scale divergence belt on middle high level develops and maintains, all these constitute the 3-dimensional flow structure of the MCC.

Key Words: heavy rainfall MCC diagnostic analysis

引言

对于青藏高原东侧暴雨的研究,我国气象工作者做了大量研究工作^[1-5],但对 MCC 的研究比较少^[6]。中尺度对流复合体(MCC)在我国中东部(103°E 以东)地区频繁出现,常造成许多地区暴雨和区域性降雹以及毁灭性的暴洪事件。因此,加强对 MCC 发生发展和移动规律的研究,对青藏高原东部防灾减灾具有重要意义。

2006 年 7 月 2 日 08—20 时(北京时,下同),陕北南部、山西中南部普降暴雨,局地降大暴雨和特大暴雨,其中陕西甘泉县 12 小时降水量达到 145mm。暴雨造成山洪爆发,城市内涝积水严重,经济损失巨大,仅甘泉一县造成经济损失达 5860 万元。依据 MCC 的定义和卫星红外云图资料分析^[7],表明这次区域性暴雨、局地大暴雨和特大暴雨是由一个典型的 MCC 直接影响造成的。本文就其生成、发展过程进行综合分析和研究,以此对黄河中游由 MCC 引发致洪暴雨的预报提供依据。

1 MCC 云图演变特征

在 FY-2C 卫星云图上,2 日 08 时,陕北

南部(位于定边、甘泉、黄龙至运城)生成呈西北东南向窄带状中- β 尺度强对流云团,强对流中心在甘泉至黄龙之间,云顶红外亮温 $TBB \leq -66^\circ\text{C}$ (图 1a, 见彩页)。2 日 12 时,随着 MCC 云团主体向东北方向移动和发展,云体强度增强,云顶红外亮温 $TBB \leq -72^\circ\text{C}$; 云体变宽, $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 冷云盖面积达到 120000km^2 , $TBB \leq -53^\circ\text{C}$ 冷云区面积达到 60000km^2 , 云团初显椭圆状, MCC 进入初始时刻(图 1b, 见彩页)。受 MCC 生成和发展的影响,2 日 08—14 时,陕北南部出现暴雨中心,甘泉县 6 小时降水量达到 80mm(图 2a)。2 日 17 时,云团在东移过程中在山西南部 and 河南交界地带再次发展, $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 冷云盖面积达到 210000km^2 , $TBB \leq -53^\circ\text{C}$ 冷云区面积达到 160000km^2 , 椭圆率接近 1.0, 亮温 $TBB \leq -72^\circ\text{C}$, MCC 进入鼎盛期(图 1c, 见彩页)。2 日 18 时, MCC 和西部、东南部新生云体连在一起,但 $TBB \leq -53^\circ\text{C}$ 冷云区的椭圆特征仍清晰可见(图略)。2 日 19 时,云团结构变得松散,云体不再具有椭圆特征, MCC 进入消亡阶段(图 1d, 见彩页)。受 MCC 的影响,从 2 日 14—20 时,陕北南部再次出现暴雨中心,6 小时降水量达到 84mm;山西南部也出现暴雨

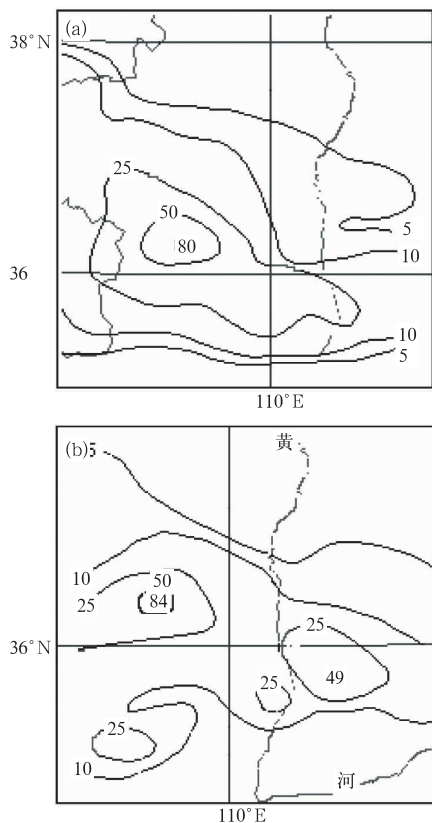


图2 2006年7月2日08—14时(a)
14—20时(b)降水量(单位:mm)

中心,6小时降水量达到49mm(图2b)。

以上卫星观测事实可以清楚地反映出,这次陕北南部、山西中南部区域性暴雨、部分地区大暴雨和局地特大暴雨过程,降水系统具有明显的MCC特征,是一次典型的MCC过程,MCC的生命史长达11小时以上。

2 MCC生成发展的环境条件

2.1 环流背景、中尺度影响系统

200hPa等压面上,2006年7月2日08时,青藏高压北侧从南疆南缘、内蒙古西部、河套北部至华北中部形成一支呈反气旋旋转的急流,急流出口区(呈分支发散气流区)在河南、安徽和山东交界地带生成一散度 ≥ 20

$\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 尺度大于300km强辐散区(见图3a);2日20时,急流出口处分支发散气流区出现不连续后退,和分支发散气流耦合的强辐散中心也出现不连续后退,在MCC发生区生成度 $\geq 16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的强辐散中心(见图3b)。

500hPa等压面上,7月2日20时,在河套MCC发生区生成一“人”字型切变线(图3c)。

850hPa等压面上,7月2日20时,河南南阳生成 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 南风急流,郑州、西安分别生成 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 南风,南风气流的北端从河南和山西的交界地带至关中生成一暖式横切变(图3d);同时从图3d看到,华北冷空气的南下倒灌已伸入暖湿切变辐合区。

从上述分析可见,对流层中低层深厚暖湿切变辐合的形成,配合对流层高层急流分支出口处生成中- α 尺度强辐散、对流层低层华北冷空气南下倒灌锋生产生的动力抬升作用,形成有利于MCC生成发展的环流背景。显然,由于地域的不同,MCC生成发展的环流形势和Maddox^[8-11]总结的环流形势有很大差异。

2.2 西南低空急流、分支南风气流与水汽输送

低空急流常是动量、热量和水汽的高度集中带,将为发生暴雨提供动力和热力条件,对不稳定能量的积累、输送和释放起关键作用^[11]。2日08时,700hPa等压面上,伴随平凉 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南低空急流的生成,在低空急流的前方生成一向北伸展的水汽通量高值舌,伸入MCC发生区(以下简称GR区)(图4a);850hPa等压面上,在西南低空急流左侧生成 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的南风分支气流,和南风分支气流耦合生成一水汽通量高值舌伸入GR区(图4c);在700hPa西南低空急流和850hPa南风分支气流的共同作用下,GR区从850~400hPa生成 $T - T_d \leq 3.4^\circ \text{C}$ 深厚饱

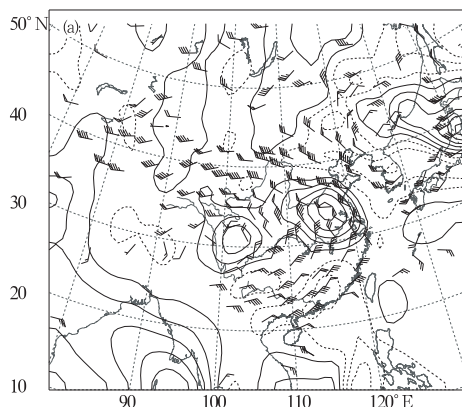


图 3a 2006年7月2日08时200hPa风场和散度场 (单位: 10^{-5}s^{-1})

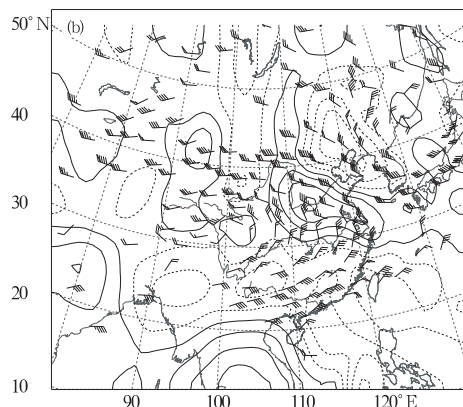


图 3b 2006年7月2日20时200hPa风场和散度场 (单位: 10^{-5}s^{-1})

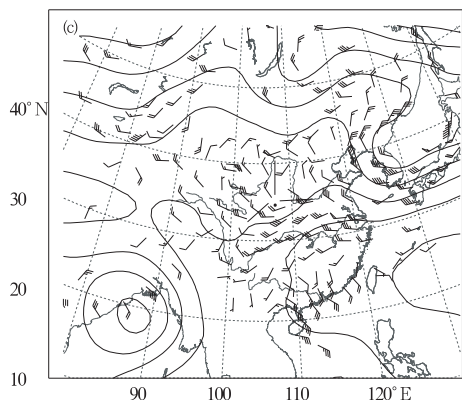


图 3c 2006年7月2日20时500hPa风场和高度场

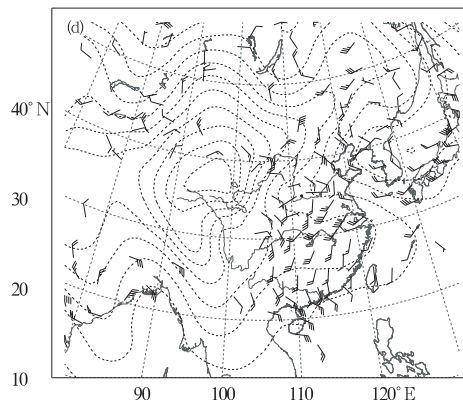


图 3d 2006年7月2日20时850hPa风场和温度场

和区,提供了适合于 MCC 生成发展的理想的深厚的潮湿大气^[13]。2 日 20 时,700hPa 等压面上,伴随西南低空急流的东移南压,和西南低空急流耦合的水汽通量高值区伸入 MCC 成熟区(以下简称 MR 区)(图 4b);850hPa 等压面上,随着南风分支气流的增强,和南风分支气流耦合的水汽通量高值舌也伸入 MR 区(4d),MR 区从 850~400hPa 生成 $T-T_d \leq 1.2^\circ\text{C}$ 深厚湿区,提供了适合于 MCC 发展的理想的深厚的潮湿大气^[12]。

2.3 能量场特征以及不稳定能量诊断分析

分析能够综合反映温湿(能量)条件的 θ_{se} 场(图略),2 日 08 时,从 925~700 hPa GR

区受向北伸展的高能舌控制。GR 区内, $\theta_{se850} - \theta_{se500} = 6^\circ\text{C}$, $\theta_{se850} - \theta_{se700} = 4^\circ\text{C}$,属于弱对流不稳定。2 日 20 时,MR 区内, $\theta_{se850} - \theta_{se700} = 4^\circ\text{C}$,也属于弱对流不稳定。从图 5 可见,2 日 08 时,GR 区东部对流层中层来自北方的低能区和边界层高能区形成叠置,使 GR 区($107 \sim 111^\circ\text{E}$,下同)形成对流不稳定;但 GR 区对流层低层的下沉运动(见图 6e)使对流受到抑制,为对流不稳定能量的积累创造了有利条件。2 日 20 时,和图 3d 华北冷空气南下相对应,同时在边界层 MCC 发生区形成纬向能量锋生(图略)。可见,华北冷空气的南下倒灌在边界层产生的能量锋生也是 MCC 的生成和发展的触发机制之一。

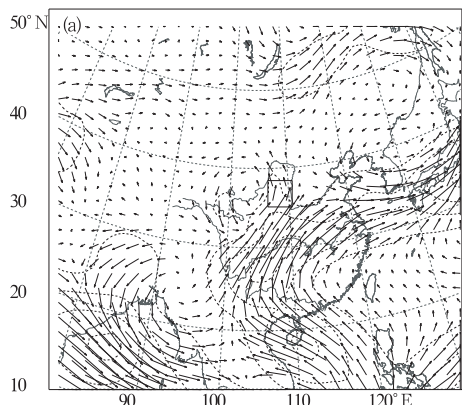


图 4a 2006年7月2日08时700hPa水汽通量和风矢量
(水汽通量单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

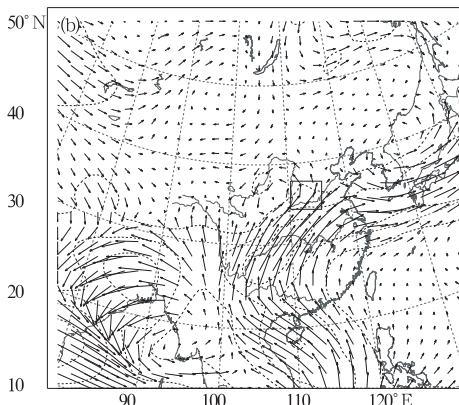


图 4b 2006年7月2日20时 700 hPa水汽通量和风矢量
(水汽通量单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

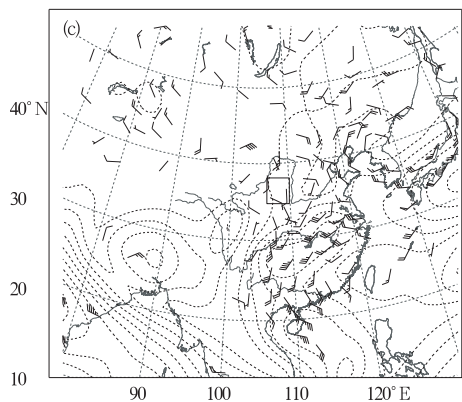


图 4c 2006年7月2日08时850hPa水汽通量和风场
(水汽通量单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

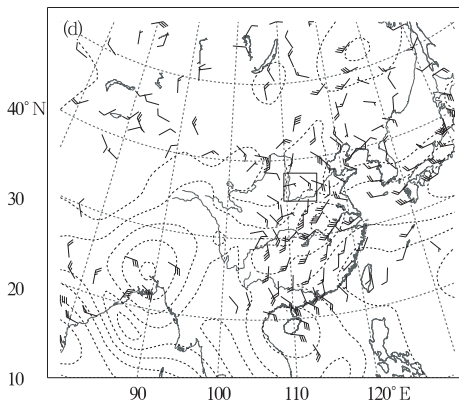


图 4d 2006年7月2日20时 850 hPa水汽通量和风场
(水汽通量单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

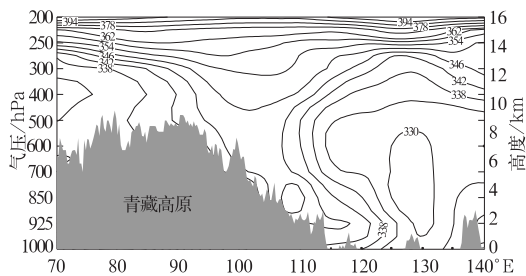


图 5 2006年7月2日08时过GR区剖面图
实线: θ_{se} , 单位: K

2.4 动力条件

2.4.1 单站垂直风场特征

由于此次 MCC 在延安附近生成并获得发展,可利用 2 日 08 时延安高空测风资料对

MCC 垂直风场演变进行分析。以 850hPa 以下层次作为云底以下低层,以 700hPa 作为云体下部,以 200hPa 作为云体上部。MCC 发生时,云底以下低层为 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏南风;从云底以下低层到云体下部风向随高度逆转接近 60° ;从云体下部到云体上部风速垂直切变平均达到 $3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速和风向垂直切变以及云底以下低层风速,有利于单体风暴的生成发展和较长时间的维持^[13]。

2.4.2 动力系统的空间结构及其演变

从图 6a 可见,7 月 2 日 08 时,GR 区对流层中低层正涡度开始发展,上游生成 $3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的正涡度中心;GR 区对流层高层负涡度开始发展,上游生成 $-7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的负

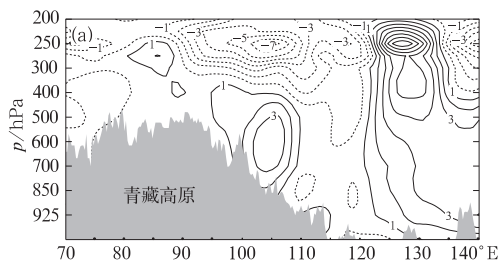


图 6a 2006年7月2日08时涡度剖面图
(单位: 10^{-5}s^{-1})

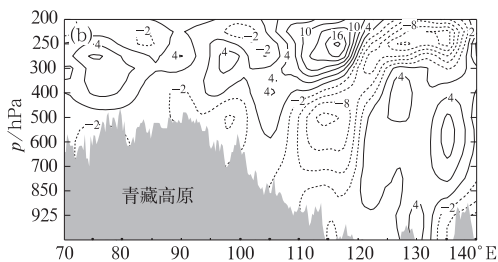


图 6b 2006年7月2日08时散度剖面图

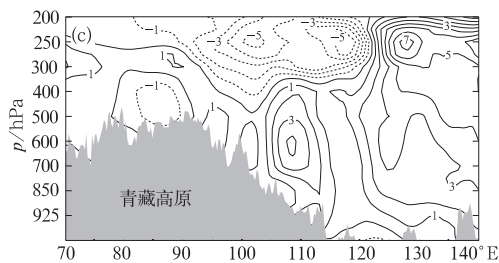


图 6c 2006年7月2日20时涡度剖面图

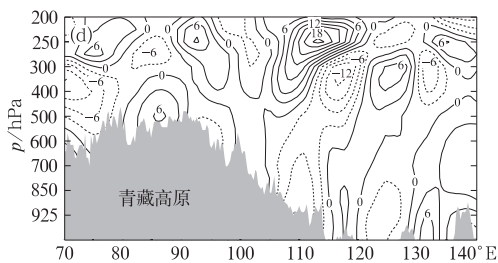


图 6d 2006年7月2日20时散度剖面图

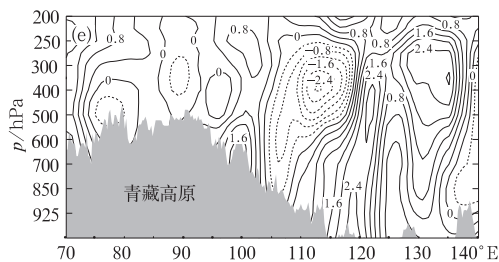


图 6e 2006年7月2日08时 ω 剖面图

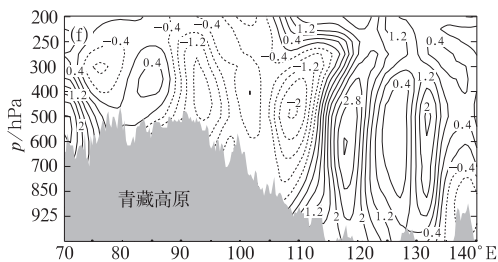


图 6f 2006年7月2日20时 ω 剖面图

涡度中心。从图 6b 可见, MR 区 ($109 \sim 113^\circ\text{E}$, 下同) 下游 (115° 附近) 对流层中低层生成 $-8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐合中心, 对流层高层生成 $16 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的辐散中心; GR 区对流层低层为弱辐合, 对流层高层为弱辐散; 涡度场和散度场的配置, 使 GR 区对流层上升运动开始发展 (图 6e), 对应 GR 区中- β 尺度对流云团开始发展。7 月 2 日 20 时, GR 区涡度的空间配置向东移入 MR 区 (图 6c), MR 区下游散度的空间配置不连续后退移至 MR 区 (图 6d), MR 区涡度场和散度场形成耦合, 形成强烈的上升运动 (图 6f), 对应 GR 区中- β 尺度对流云团东移发展成为 MCC。

3 多普勒雷达资料分析

以延安多普勒雷达获得的资料, 对此次 MCC 暴雨过程做进一步分析。

2 日 08:00, 延安对流层低层已有强东南风生成, 延安对流层低层同时有西南低空急流生成, 西南低空急左侧同时生成比较强的气旋性辐合, 对流层中高层有径向辐散开始发展 (图 7a, 见彩页); 在对应的反射率因子图上, 有大于 30dBz 呈西北东南向中- β 尺度云团生成 (图 8a, 见彩页)。2 日 12:01, 有东南风低空急流生成, 西南低空急流同时发展,

西南低空急流左侧气旋性辐合维持,对流层中高层径向辐散获得很大发展(距雷达 100~150km 处,下同)(图 7b,见彩页);在对应的反射率因子图上,大于 30dBz 云区获得发展,这时 MCC 进入初始时刻(图 8b,见彩页)。2 日 14:01,东南低空急流、西南低空急流、以及西南低空急流左侧气旋性辐合维持,对流层中高层的径向辐散进一步获得发展(图 7c,见彩页);在对应的反射率因子图上,大于 30dBz 云区范围有所减小,但大于 30dBz 云团中心区变得密实(图 8c,见彩页)。2 日 18:20,东南低空急流再度发展,生成 $V \geq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 急流中心;对流层中低层的气旋性辐合维持,对流层低层的西南入流急流维持,对流层中高层同时形成呈弓状的径向强辐散带(图 7d,见彩页);在对应的反射率因子图上,大于 30dBz 的云区再度获得发展,这时 MCC 进入鼎盛期(图 8d,见彩页)。20:06,除了东南低空急流维持外,对流层低层的西南入流气流大幅度减弱,对流层中高层径向辐散大幅度减弱(图 7e,见彩页);在对应的反射率因子图上,云团减弱,变成零散的云块,不再具有 MCC 特征(图 8e,见彩页)。

从上述分析可见,东南低空急流的生成、配合西南低空急流生成和稳定,西南低空急流左侧有气旋性辐合维持、配合对流层中高层径向强辐散,构成 MCC 致洪暴雨的三维流场结构。

4 结 语

通过上述分析,可得出如下结论。

(1) 对流层中低层深厚暖湿切变辐合的形成,配合对流层高层急流分支出口处生成中- α 尺度强辐散、对流层低层华北冷空气南下倒灌锋产生的动力抬升作用,形成有利于 MCC 生成发展的环流背景。

(2) MCC 发生在高能、弱对流不稳定

区。700hPa 西南低空急流、850hPa 分支南风气流为 MCC 的生成和发展提供了充足的水汽输送和能量输送。

(3) MCC 发生区对流层中低层正涡度区和对流层高层负涡度区配置的东移,MCC 成熟区下游对流层中低层辐合区和对流层高层强辐散区配置的不连续后退,使 MCC 成熟区涡度场和散度场形成耦合、出现强烈的上升运动,成为 MCC 发生发展和维持的动力机制。

(4) 多普勒雷达径向速度场揭示了 MCC 致洪暴雨的三维流场结构,即:东南低空急流的生成、配合西南低空急流生成和稳定,西南低空急流左侧有气旋性辐合维持、配合对流层中高层径向强辐散,构成 MCC 致洪暴雨的三维流场结构。

参考文献

- [1] 宗志平,张小玲. 2004 年 9 月 2—6 日川渝持续暴雨过程初步分析[J]. 气象,2005,31(5):37-41.
- [2] 王川,寿绍文. 一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析[J]. 气象,2003,29(7):7-12.
- [3] 尤红,曹中和. 2004 年云南秋季强降水水位涡诊断分析[J]. 气象,2006,32(7):95-101.
- [4] 王丛梅,丁治英,张金艳. 西北涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 气象,2005,31(11):28-33.
- [5] 段海霞,毕宝贵,陆维松. 2004 年 9 月川渝暴雨的中尺度分析[J]. 气象,2006,32(5):74-79.
- [6] 柳林,张国胜. 鲁西北中尺度对流复合体环境场特征[J]. 气象,2000,26(11):40-44.
- [7] 许健民,方宗义,卢乃锰,等. 卫星与雷达图像在天气预报中的应用[M]. 北京:科学出版社,1998:312-325.
- [8] Maddox R A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude mesoscale convective complexes[J]. Mon Wea Rev,1983,111:1475-1493.
- [9] Maddox R A,Chappell CF,et al. Synoptic and mesoscale aspects of flash flood events[J]. Bull Am meteor soc,1979,60:115-123.
- [10] Maddox R A. Mesoscale Convective Complexes. Bull Am Meteor Soc, 1980,61:1374-1387.
- [11] 杨晓霞,张爱华,贺业坤. 连续冰雹天气物理特征分析[J]. 气象,2000,26(4):52-53.
- [12] 寿绍文,励申申,姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社,2003:120-140.
- [13] 胡明宝,高太长,汤达章. 多普勒雷达资料分析与应用[M]. 北京:解放军出版社,2000:170-180.

井宇等：黄河中游一次MCC致洪暴雨综合诊断分析

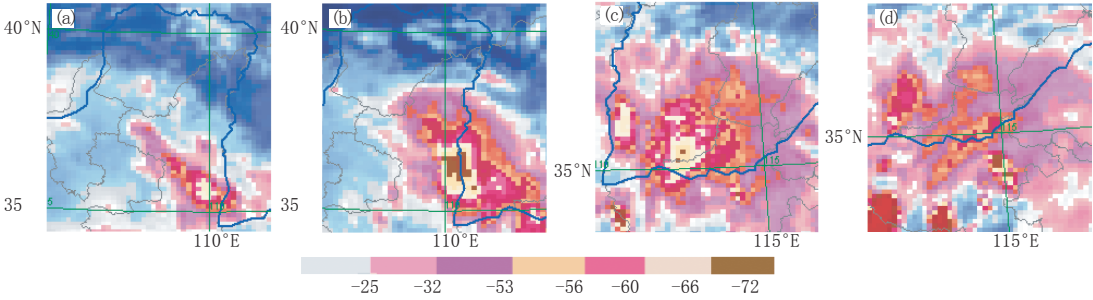


图 1 2006年7月2日FY2C卫星云图
(a) 2日08时, (b) 2日12时, (c) 2日17时, (d) 2日19时

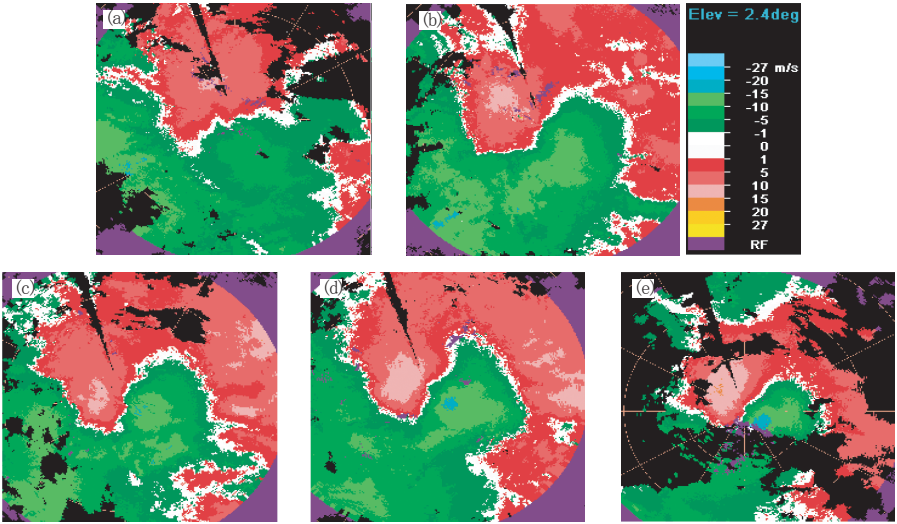


图 7 2006年7月2日2.4°仰角多普勒雷达径向速度
(a) 08:00; (b) 12:01; (c) 14:01; (d) 18:20; (e) 20:06

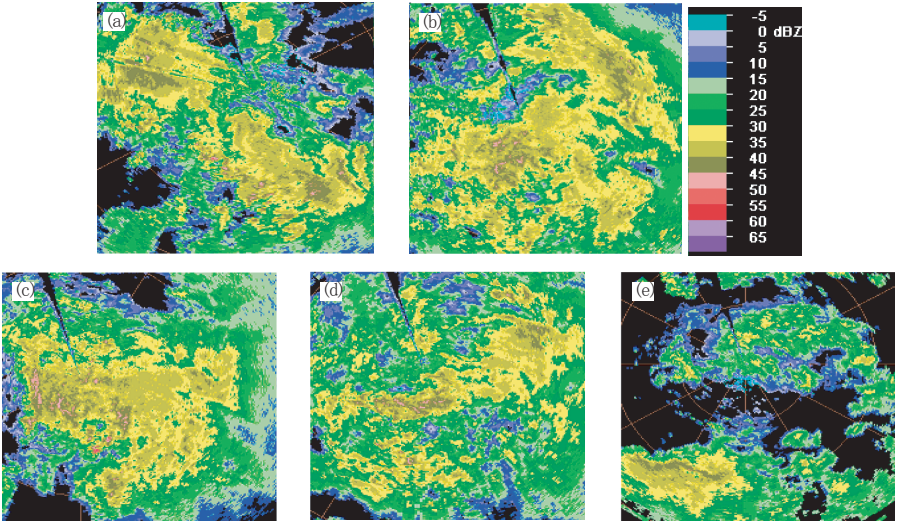


图 8 2006年7月2日2.4°仰角多普勒雷达反射率因子
(a) 08:00; (b) 12:01; (c) 14:01; (d) 18:20; (e) 20:06