

万夫敬,刁秀广,2018. 两次 MCC 红外云图特征与天气实况异同性分析[J]. 气象,44(6):759-770.

两次 MCC 红外云图特征与天气实况异同性分析*

万夫敬^{1,3} 刁秀广²

1 青岛市气象局,青岛 266003

2 山东省气象局,济南 250031

3 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心,青岛 266003

提 要: 利用 FY-2E 红外云图、多普勒雷达资料,结合环境形势及物理量场,分析了 2011 年 8 月 15—16 日(简称“0815MCC”)山东北部和河北南部、2015 年 7 月 30—31 日(简称“0730MCC”)山东中部和南部地区两次中尺度对流复合体(MCC)产生的区域性暴雨过程。结果表明:(1)两次 MCC 过程,降水集中在 MCC 形成到成熟阶段。强降水分布都具有非对称性,主要在风暴传播方向上黑体亮温(TBB)冷中心附近及其西侧和南侧。地面中尺度辐合系统的强度、移向与新生单体发展密切相关。(2)正涡度高值区、散度和垂直速度的负值中心的重叠区具有显著的动力条件,对 MCC 具有强“吸引力”,导致明显的后向传播特征。(3)雷达 VWP 产品显示,有超低空急流的建立,为 MCC 的形成与维持提供了能量与动力条件。低层风之间的辐合切变,为新对流单体的生成提供了抬升触发机制。当相邻雷达之间的速度差迅速增大时,强降水开始。(4)“0815MCC”的-52℃冷云面积是“0730MCC”的 4 倍,TBB 比“0730MCC”平均低 10℃。“0815MCC”低层辐合和高层辐散更强烈,能量更集中,使风暴发展更高,云顶亮温更低;风暴顶强烈辐散将云中冰晶粒子等带到更远的高空,在红外云图上出现较大的冷云面积;同时“0815MCC”强垂直风切变将高空冰晶粒子带到云砧处造成蒸发,降低了降水效率,导致“0815MCC”过程暴雨范围和降水强度小于“0730MCC”。

关键词: 超低空急流,中尺度对流复合体(MCC),黑体亮温(TBB),对流云合并

中图分类号: P458.2

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.004

Comparative Analysis on Cloud Evolution Features and Weather of Two MCCs

WAN Fujing^{1,3} DIAO Xiuguang²

1 Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003

2 Shandong Meteorological Service, Jinan 250031

3 Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003

Abstract: By using satellite images, weather radar data, combined with the environmental situation and physical characteristics, two mesoscale convective complex (MCC) events in northern Shandong and southern Hebei in 15—16 August 2011 (“0815MCC”), and central and southern regions of Shandong in 30—31 July 2015 (“0730MCC”) are analyzed. Comparisons show that (1) the distribution of heavy rainfall is asymmetric, mainly in the center of TBB and its west and south side. The precipitation is concentrated in the stage from formation to mature stage of MCC. The intensity and moving direction of surface mesoscale convergence system are closely related to the development of new cells. (2) The overlapping area of the high vorticity, divergence and vertical velocity is favorable for the development of MCC, which is the main factor for its movement toward southwest. (3) Radar VWP product shows that the establishment of the ultra-lower-level jet helps the happening of severe precipitation and maintenance of MCC. When the ultra-

* 青岛市气象局青年科研专项(2016qdqxq1)、山东省自然科学基金项目(ZR2016DM20)和国家自然科学基金项目(41375120)共同资助

2017 年 3 月 1 日收稿; 2017 年 9 月 5 日收修定稿

第一作者:万夫敬,主要从事短期天气预报和中尺度灾害性天气预报研究。Email:fjwan1985@163.com

low-level jet velocity difference increases to a certain extent, the heavy rainfall begins. (4) The low-level convergence and high-level divergence of “0815 MCC” offer dynamic conditions, causing higher development, lower cloud top temperature, larger area of cold cloud than “0730 MCC”; meanwhile, the strong vertical wind shear brings the ice crystals to the thunder head, which may reduce the precipitation efficiency, so the 0815 MCC’s rainstorm range and maximum precipitation intensity are less than those of “0730 MCC”.

Key words: ultra-low-level jet, mesoscale convective complex (MCC), black body temperature (TBB), merger of convective clouds

引 言

中尺度对流系统是暴雨的直接制造者,在我国东部沿海经常出现,常造成暴雨、区域性降雹及毁灭性暴洪事件(侯淑梅等,2017;王宗敏等,2014;陈贵川等,2013;陈永仁和李跃清,2013;井喜等,2009)。中尺度对流复合体(MCC)是中尺度对流系统中范围最大、最强的降水系统。MCC造成的降水强度大、范围广,常给国民经济和人民生命财产造成严重损失。如2007年7月18—19日山东省大范围对流性暴雨、上海“0185”特大暴雨都是对流强烈迅速发展,形成MCC而产生的对流性暴雨或大暴雨(杨晓霞等,2008;陈永林等,2007)。因此,加强对我国东部沿海地区MCC发生发展规律的研究,对防灾减灾具有重要意义。

MCC的概念最早由Maddox(1980)提出,定义为: -32°C 冷云盖面积 $\geq 10 \times 10^4 \text{ km}^2$, -52°C 冷云盖面积 $\geq 5 \times 10^4 \text{ km}^2$,持续时间应 $\geq 6 \text{ h}$,椭圆形偏心率 ≤ 0.7 。目前,对MCC形成的环流背景、云图和雷达特征已有较多研究工作(刁秀广等,2009;卓鸿等,2012;张迎新等,2015;俞小鼎,2012;王宁等,2016;曾波等,2013;韦惠红等,2013)。MCC降水特征研究方面,也取得了较多成果。Smull and Augustine(1993)发现成熟的MCC三维流场与显著的对流不稳定促进了降水类型的非对称性。井喜等(2011)对发生在四川东北部和重庆西部的MCC降水过程分析认为降水强度与云顶红外亮温TBB最大值之间关系不明显,而与降水强度与云团北边界TBB梯度有很大关系;范俊红等(2009)对河北中部一次MCC个例研究中发现强降水出现在MCC中 $\text{TBB} \leq -70^{\circ}\text{C}$ 覆盖的区域;陈茂强等(2008)发现中尺度对流云团逆基本气流缓慢移动,强降水出现在冷云中心附近;刁秀广等(2015)认为强降水基本产

生在TBB冷中心的西侧。上述研究成果对认识MCC过程的降水分布提供了较好的基础。MCC作为暴雨中的一种特殊系统,与一般暴雨云团发生、发展所要求的大尺度环境条件和降水的特点不尽相同,已有学者开展此类研究工作(苗爱梅等,2012;张晰莹等,2010)。而研究不同MCC降水过程发生、发展和移动规律,了解其降水分布特点和异同性,可以帮助理解它们的行为特征,有助于提高短时临近预报水平。

本文选取2011年8月15—16日和2015年7月30—31日发生在山东北部和河北南部、山东中部和南部地区两次MCC造成的暴雨局部大暴雨过程进行对比分析,以便对该地区MCC降水预报提供有益的参考依据。

1 过程概述

2011年8月15日12时至16日08时(北京时,下同),山东北部和河北南部出现暴雨局部大暴雨,11个国家级气象站出现暴雨,1个国家级气象站出现大暴雨,最大降雨量出现在河北海兴县221.0 mm(图1a)。国家级气象站小时最大降水量为84.3 mm,16日00—01时出现在宁津站。04时之后,降水量迅速减弱。鲁中和半岛北部地区降水量较小,基本为小雨量级,鲁南和半岛南部地区基本无降水。

2015年7月30日14时至31日08时,山东中部和南部地区出现暴雨局部大暴雨(图1b),24个国家级气象站达到暴雨,6个国家级气象站出现大暴雨,最大降水量为149.0 mm,出现在山东平阴气象站;20时至次日07时小时最大降水量都在50 mm以上,小时最大降水量为112.6 mm,31日01—02时出现在汶上县次丘站;31日07时之后降水迅速减弱。

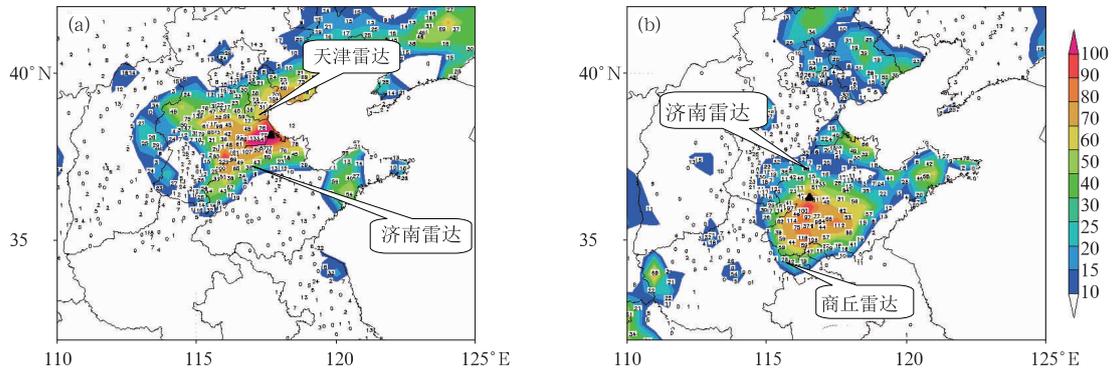


图1 2011年8月15日08时至16日08时(a)和2015年7月30日08时至31日08时(b)24 h 累计降水量(阴影,单位:mm)分布
(▲为最大降雨位置)

Fig. 1 Distribution of 24 h cumulative precipitation (shaded, unit: mm)
(a) 08:00 BT 15—08:00 BT 16 August 2011,
(b) 08:00 BT 30—08:00 BT 31 July 2015
(▲ is the maximum rainfall location)

2 红外云图演变特征

灾害性强对流天气中,往往会出现对流云之间的合并(翟菁等,2012;张京英等,2010;汪小康等,2012),对流云合并是影响对流云发展和降水持续增强的重要过程。对流云合并能够引起回波增强、云顶抬高、云水及冰相物质含量增加,不仅会使得对流云的尺度增大、强度增强,而且还会提高降水效率、引起地面强降水,是短时强降雨发生机制之一(陈静静等,2011;刘裕禄等,2015)。在对流云合并过程中是否伴有中小尺度系统生成,是短时强降雨发生的关键所在。对流云合并存在一定的约束条件,根据合并前对流云团之间的间距和强度差异,分为四大类(黄美元等,1987;黄勇等,2016)。当对流云团相距较远而强度接近时,云间的相互影响较小,虽然会有互相延伸的趋势,但不会发展合并;当对流云团相距小且强度接近时,对流云之间合并的可能性最大;当对流云团相距小但强度差异大时,不发生合并,而是弱云(TBB相对较低者)减弱,强云(TBB相对较低者)发展;当对流云团相距较远且强度差异大时,对流云间相互作用小,不发生合并。本文中两次MCC过程云团合并也符合这一规律。

2.1 “0815 MCC”云图特征

图2给出了2011年8月15—16日暴雨过程

(简称“0815MCC”)FY-2E卫星红外云图演变特征。15日12时左右(图2a),山东德州与河北沧州一带有对流云团生成(云团1),同时在山西西部也有对流云团生成(云团2)。云团1和云团2相距较远,相互影响较小。云团1基本原地发展,云团2在东移过程中逐渐发展。16时前后(图2b),云团1与云团2之间的山西中西部地区出现零散的对流云团。发生于山西中西部区域的对流云团东移发展,20时前后(图2c)发展成 β 中尺度对流系统(云团3),由于这些云团之间相距小但强度差异大,不发生合并。故此时云团1已经明显减弱,云团2也开始减弱,22时前后(图2d)云团2在山西中部消散,而较强云团3发展显著;同时在云团1的东部又有新的云团生成(云团4),强度不断加强。云团3在21—22时发展旺盛,冷中心基本位于云团中心,而云团4发展过程中冷中心处于云团西侧。云团3和云团4之间相距小且强度接近,云团之间有合并的趋势。23时(图2e)云团3和云团4合并,冷中心合为一体,云体增强发展,为对流系统维持补充了能量。云团合并后,云核面积(TBB $<$ -32 $^{\circ}$ C)增大、云顶的亮温降低,促使MCC形成。

15日23时至16日06时MCC处于发展旺盛阶段(图2e~2h),-52 $^{\circ}$ C冷云面积(简称冷云面积)分别为8万、11万、13万、19万、22万、24万、22万和14万 km^2 ,云顶亮温基本在-78 $^{\circ}$ C~-74 $^{\circ}$ C。整个MCC旺盛阶段维持椭圆状,长轴呈东北—西南

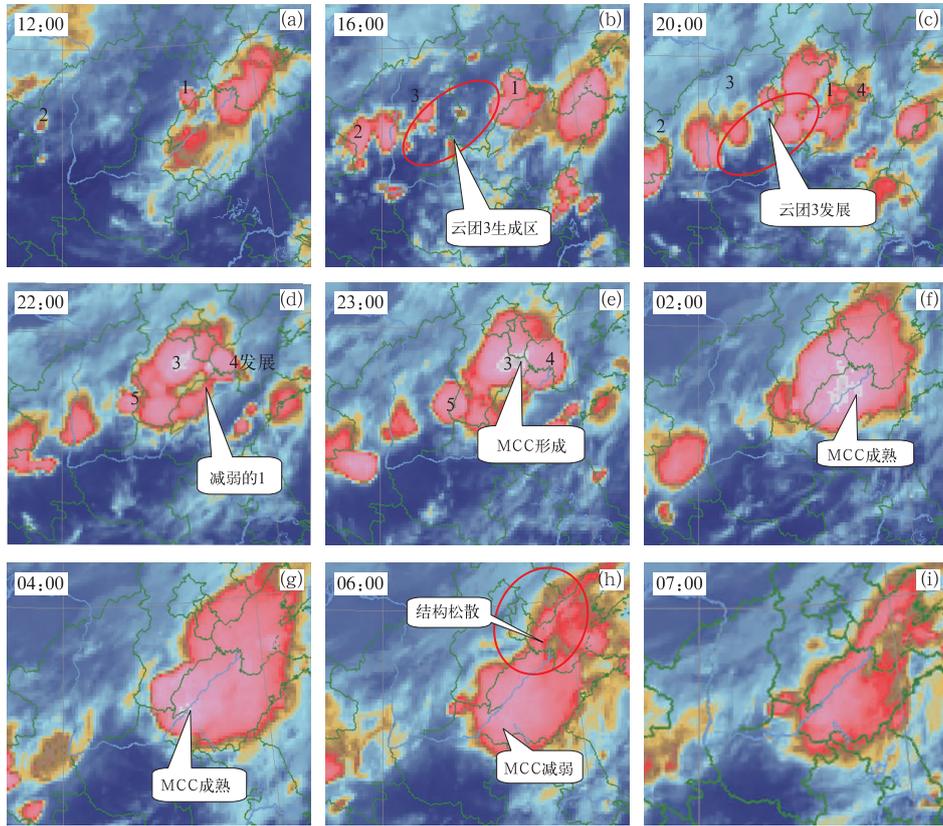


图 2 2011 年 8 月 15—16 日 FY-2E 红外云图演变特征

Fig. 2 Evolution characteristics of convective clouds based on infrared satellite images in 15–16 August 2011

向,成熟阶段系统整体向西偏南方向发展维持,移动较为缓慢。MCC 系统左侧不断有新的对流云团生成、发展、合并,使得 MCC 向西南方向移动。MCC 强盛阶段反射率因子呈带状分布,基本位于 TBB 中心及其西南侧。在降水雨带南压过程中,其左侧有新的对流回波生成、发展,与主体回波合并,使得降水雨带在缓慢南压过程中逐渐向西南方向发展。从小时降水量 ≥ 30 mm 的气象站的分布情况(图 3)可以看出,强降水分布具有非对称性,主要集中在 TBB 梯度大值区一侧,即 MCC 云团 TBB 冷中心附近及其西南侧,强降水阶段均有类似特征(降水量时间与 TBB 时间相差 1 h,如 02 时降水是指 01—02 时降水量,TBB 则为 01 时数据,图 3 中时间以 TBB 时间标注)。

16 日 06 时(图 2h)左右 MCC 开始减弱,其下风方向云团结构变得松散,尺度变小,但仍满足 MCC 标准。07 时 MCC 尺度进一步变小,冷云面积迅速减小到 6 万 km^2 ,冷中心 TBB 为 -73°C ,降水明显减弱,实测小时降水量 < 20 mm。08 时整个云

团结构变得更为松散,冷云面积减小到 5 万 km^2 以下,冷中心 TBB 上升到 -63°C ,MCC 特征消失。MCC 减弱非常迅速,基本在原地消散。MCC 减弱阶段 TBB 明显升高,冷中心 TBB 由 -73°C 升高到 -63°C ,降水量明显减小,小时降水量 < 20 mm。以上分析可见,“0815MCC”强降水集中在 MCC 形成到成熟阶段,与 Kane et al(1987)发现大降水率在 MCC 形成至成熟之前结论一致。

2.2 “0730MCC”云图特征

图 4 给出了 2015 年 7 月 30—31 日暴雨过程(简称“0730MCC”)FY-2E 卫星红外云图演变特征。30 日 14:15 左右(图 4a),山东东部和河南西部有对流云团生成(云团 1 和云团 2),山东东部的云团(云团 2)向西移动并发展,两云团之间相距较远而强度接近,会有互相延伸的趋势。19:15(图 4b)影响到山东中部一带,河南西部的云团(云团 1)向东移动并发展成带状 β 中尺度对流系统。21:15(图 4c)云团 1 明显减弱,而云团 2 明显增强,两个对流云团相

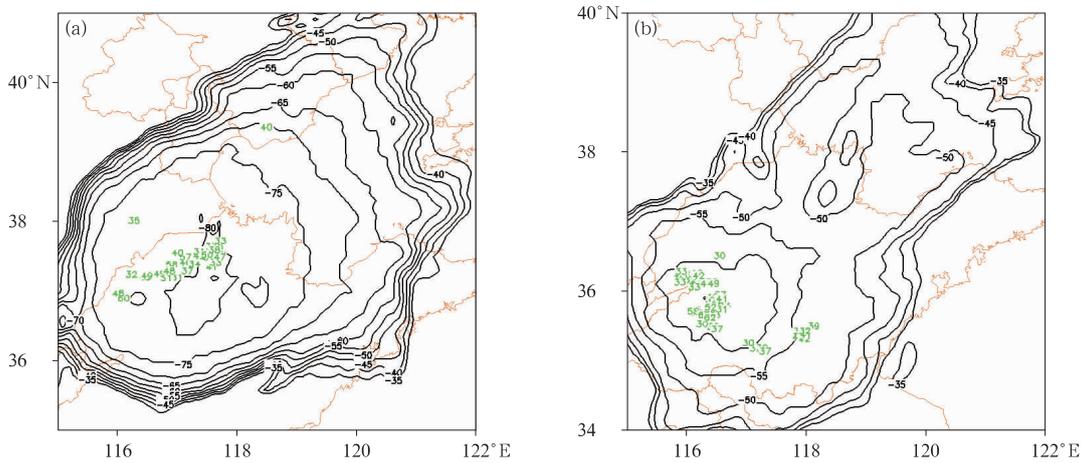


图 3 2011 年 8 月 16 日 01:00(a)和 2015 年 7 月 31 日 01:15(b)TBB 等值线(实线,单位:℃) 叠加气象站小时降水量 ≥ 30 mm 的降水量(绿色,单位:mm)
 Fig. 3 TBB (solid line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and rainfall ≥ 30 mm (green, unit: mm)
 (a) 01:00 BT 16 August 2011, (b) 01:15 BT 31 July 2015

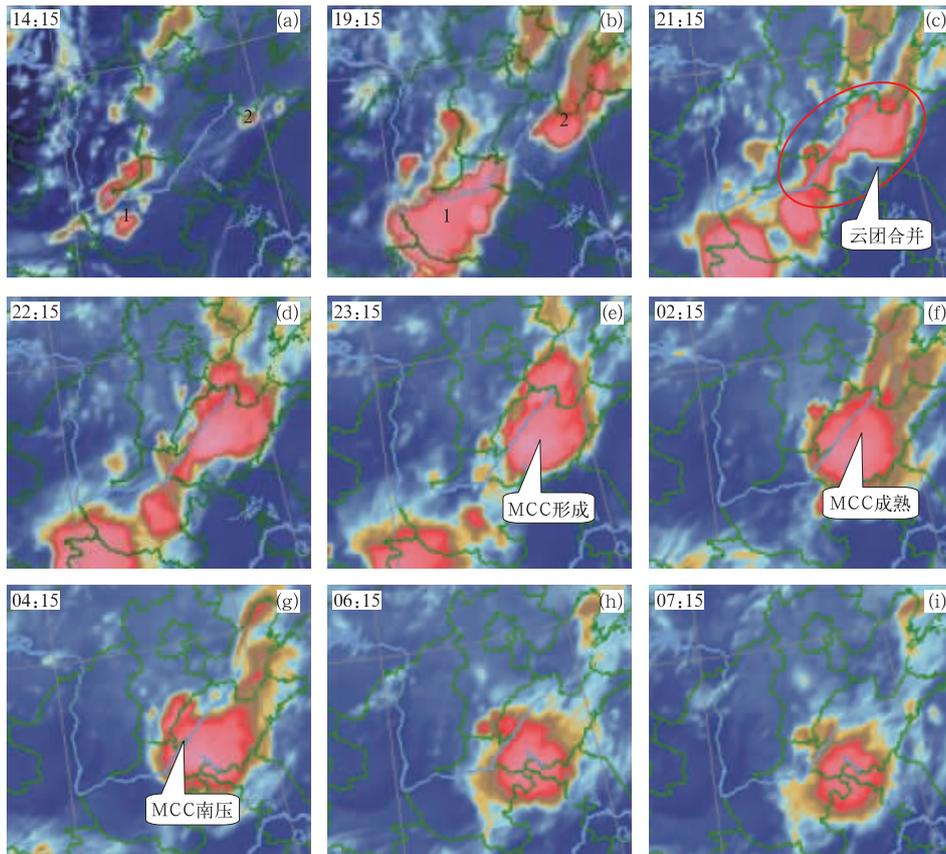


图 4 2015 年 7 月 30—31 日 FY-2E 红外云图演变特征
 Fig. 4 Same as Fig. 2, but for 30—31 July 2015

距小且强度接近,减弱的云团 1 与增强的云团 2 出现合并,22:15(图 4d)合并后的云团进一步增强发展,虽然冷云面积达到 5 万 km^2 以上,但形状达不

到 MCC 要求,23:15(图 4e)云团冷云面积和形状达到 MCC 标准,MCC 形成。

30 日 23 时至 31 日 06 时(图 4e~4h)MCC 处

于发展与维持阶段,冷云面积分别为 5 万、6 万、7 万、6 万、7 万、6 万、6 万和 6 万 km^2 ,云顶亮温基本在 $-68^\circ\text{C}\sim-63^\circ\text{C}$ 。MCC 成熟阶段系统整体向西南方向发展,同时 MCC 系统西侧不断有新的对流云团生成、发展,并与 MCC 主体合并。MCC 强盛阶段反射率因子范围较大且分布较为零散,但强反射率因子主要集中在冷中心西侧和南侧区域。降水雨带南压过程中,其左侧有新的对流回波生成、发展,与主体回波合并。强降水分布具有非对称性,主要集中在 TBB 梯度大值区一侧,即在冷中心以及其西侧和南侧(图 3b),与“0815MCC”降水分布特征类似。

31 日 07:15(图 4i)冷云面积不再满足 MCC 标准,同时冷中心 TBB 上升到 -60°C 。08:15 云团进一步减弱,冷中心 TBB 上升到 -57°C ,09 时前后基本在原地消散。MCC 减弱阶段 TBB 明显升高,降水量明显减小。“0730MCC”强降水也主要集中在 MCC 形成到成熟阶段。

3 对比分析

3.1 共同特征

演变路径相似。两次 MCC 的形成都是由东移对流系统和局地对流系统合并产生,MCC 形成后基本是西南方向发展移动,有后向传播的特征,一般强降水随西风带系统偏东移动分量较大,而这两次过程却是偏西移动分量较大。MCC 维持阶段,都具有外围较小尺度对流云团合并到 MCC 主体的特征。

产生时间和维持时间大致相同。两次 MCC 基本都形成于 23 时左右,结束于次日 07 时前后。

以短时强降水为主,降水强度大,小时降水量都出现 50 mm 以上的强降水,个别站出现雷暴大风天气,但都没有出现冰雹。强降水分布都具有非对称性,主要分布在冷中心以及其西侧和南侧,降水集中在 MCC 形成到成熟阶段。

3.2 主要差异

强降水范围存在差异。“0815MCC”阶段为 2011 年 8 月 15 日 23 时至 16 日 07 时,分别有 11 个国家气象站达到暴雨标准,其中 1 个国家气象站出现大暴雨;79 个区域自动站达到暴雨标准,其中 4 个区域自动站出现大暴雨标准;最大降水量为

176 mm,小时最大降水量为 124 mm(含区域自动站,下同);此次暴雨影响范围约 3.1 万 km^2 。“0730MCC”阶段为 2015 年 7 月 30 日 23 时至 31 日 07 时,有 17 个国家气象站达到暴雨标准,其中 5 个国家气象站出现大暴雨;252 个区域自动站达到暴雨标准,其中 43 个区域自动站出现大暴雨;最大降水量为 188.5 mm,小时最大降水量为 112.6 mm;此次暴雨影响范围约 3.8 万 km^2 。两次强降水过程中 MCC 阶段最大小时降水量和最大降水量相差不多,但暴雨影响区域面积和小时降水量整体强度“0730MCC”大于“0815MCC”,“0730MCC”出现大暴雨站 48 个,明显多于“0815MCC”,而且“0730MCC”阶段后期小时最大降水量明显强于“0815MCC”。

MCC 冷云面积和冷中心 TBB 存在明显差异。图 5 给出了 MCC 阶段两次过程中冷云面积(图 5a)和冷中心 TBB(图 5b)对比情况,可以看出,“0815MCC”阶段冷云面积明显大于“0730MCC”,“0730MCC”面积基本在 6 万 km^2 左右,“0815MCC”面积最大时几乎是“0730MCC”的 4 倍;“0815MCC”冷中心 TBB 明显低于“0730MCC”,平均差值 10°C 左右。“0815MCC”冷云中心 TBB 在 $-78\sim-73^\circ\text{C}$,济南探空 100 hPa 气温为 -73°C ,对应高度 16.8 km,云顶高度基本在 100 hPa 之上,而“0730MCC”冷云中心 TBB 在 $-68\sim-63^\circ\text{C}$,徐州探空 100 hPa 气温为 -68°C ,对应高度 16.7 km,云顶高度基本在 100 hPa 之下。无论是冷云面积还是冷中心 TBB,“0815MCC”明显优于“0730MCC”,但 MCC 阶段实际降水量(图 5c,5d)和强降水影响范围却出现相反的现象。

4 成因分析

4.1 形势背景与物理量场分析

2011 年 8 月 15 日 20 时华北南部上空 200 hPa 为辐散气流,500 hPa 为槽后弱西北气流,588 线压在山东聊城至临沂一带,700 hPa 槽线压在山东西北北部一带,850 hPa 有低压存在,中心位于河北西北部区域,地面有冷锋,同时在河北南部与山东交界处有中尺度辐合线(东北回流与西南气流辐合)(图 6a);2015 年 7 月 30 日 20 时中尺度分析(图 6b),可以看出,华北南部上空 200 hPa 为辐散气

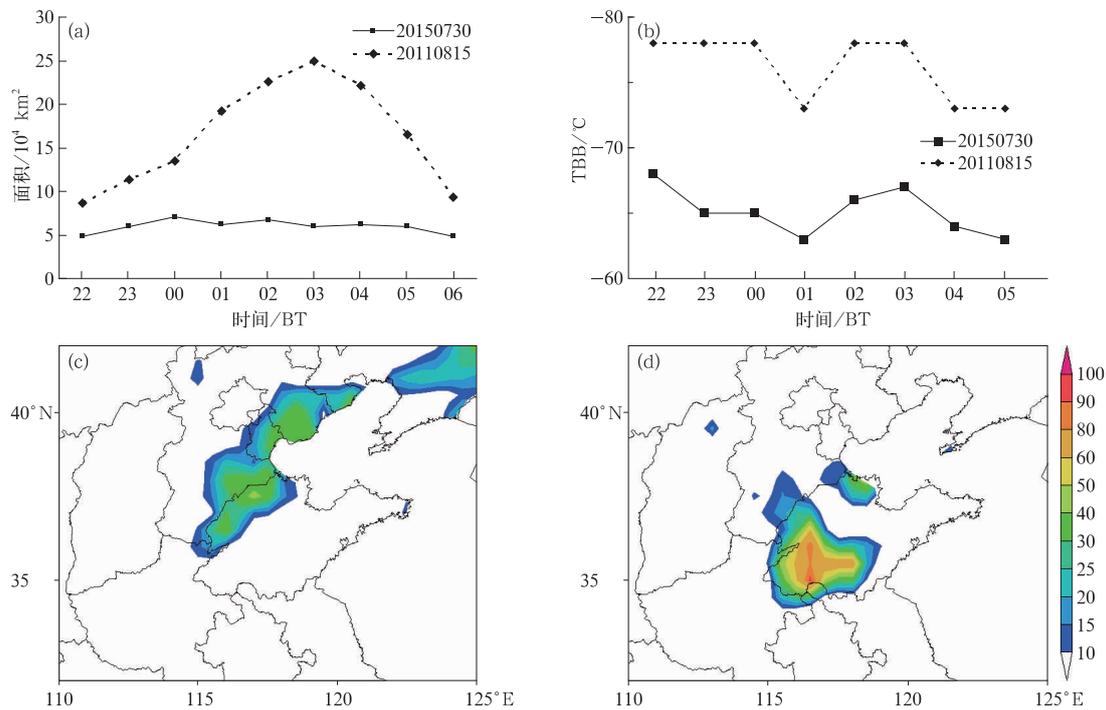


图 5 MCC 冷云面积(a)、冷中心 TBB(b)、“0815MCC”(c)和
“0730MCC”(d)阶段总降水量(c, d, 阴影, 单位:mm)分布

Fig. 5 Temporal change of MCC cold cloud area (a), TBB (b), “0815MCC” (c) and
“0730MCC” (d) accumulated precipitations (c, d, shaded, unit: mm) at stage of MCC

流,副热带高压东撤到海上,山东中西部区域 500、700 和 850 hPa 山东中部存在浅槽或切变线,有前倾特点,850 hPa 急流北伸至山东东南沿海一带区域,925 hPa 急流顶端位于安徽和江苏北部区域,地面有中尺度辐合线(东北回流与西南气流辐合,图 6b)。2011 年 8 月 15 日 20 时章丘探空资料表明,K 指数为 37°C , ΔT (850 与 500 hPa 温差)为 26°C , LI 指数为 -3.4°C , CAPE 达到 $1400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 850 和 925 hPa 的比湿分别为 14 和 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 0~6 和 0~2 km 垂直风切变分别为 18 和 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 2015 年 7 月 30 日 20 时章丘探空资料表明, K 指数为 40°C , ΔT 为 23°C , LI 指数为 -2.1°C , CAPE 为 $590 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 850 和 925 hPa 的比湿分别为 18 和 $19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 0~6 和 0~2 km 垂直风切变分别为 14 和 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 两次过程形势及环境参数均利于强降水产生。

2011 年 8 月 15 日 14 时至 16 日 02 时地面图上山东、河南、河北交界处一直存在低压区,以山东西部聊城莘县国家基本站为例(图 6c),至 16 日 02 时气压持续走低,辐合上升加强,低层气压梯度力较

大,不仅可诱发低空急流,而且使得对流系统向低压区传播。莘县 16 日 01—03 时气压较低基本为 998.5 hPa。2015 年 7 月 30 日下午至 31 日 02 时,山东西南部菏泽定陶国家基本站气压持续较低(图 6d),说明存在明显上升运动。同时比较 30 日 20 时和次日 08 时超低空急流变化情况,925 hPa 超低空急流明显增强,850 hPa 也具有相同特征,急流轴左侧应该对应明显上升区,导致风暴向西南方向传播。分析两次过程的地面加密自动站风场资料(图略),均有中尺度辐合系统对 MCC 发展、移动,对强降水分布起重要作用。2011 年 8 月 15—16 日在山东、河北交接处存在一条东北—西南走向的中尺度辐合线,其上中尺度低压伴随。15 日 23 时至次日 04 时,中尺度低压沿中尺度辐合线向西南方向移动与强降水分布特征、MCC 冷中心演变趋势较一致。2015 年 7 月 30 日 23 时至次日 04 时,山东西部和中部一带有两条中尺度低压带维持。因此,这两次过程中,中尺度地面辐合系统的移动和增强起到了触发和维持、加强的作用,强回波不断在中尺度地面辐合系统附近合并加强形成“列车效应”,是造

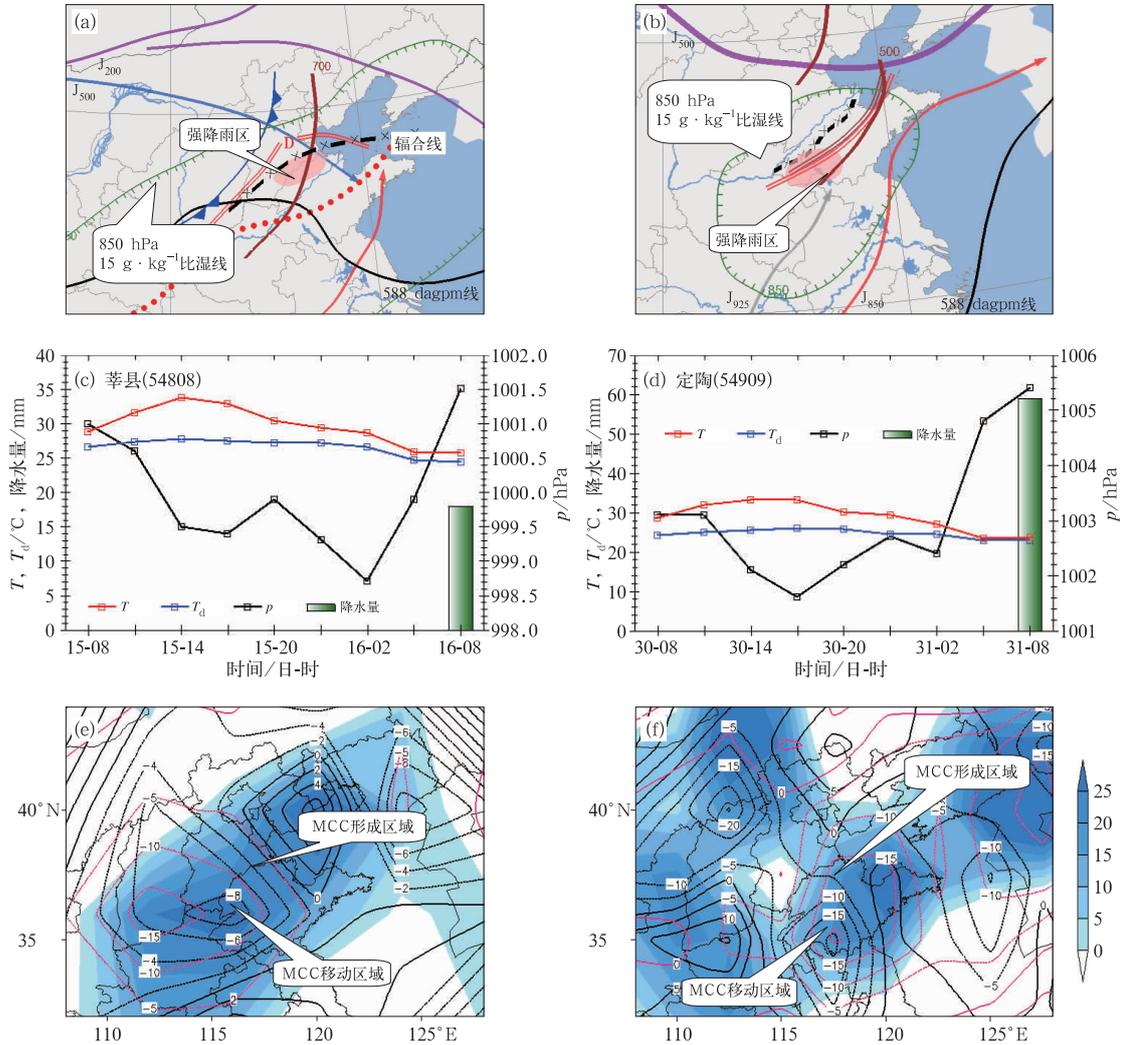


图 6 2011 年 8 月 15 日(a, c, e)和 2015 年 7 月 30 日(b, d, f)环境场和物理量场分析
(a, b) 20 时中尺度分析, (c, d) 地面三线图, (e, f) 20 时 850 hPa 涡度(填色, 单位: 10^{-5} s^{-1})、
散度(黑线, 单位: 10^{-6} s^{-1})、垂直速度(红线, 单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)实况

Fig. 6 Analysis of environmental and physical quantity fields
on 15 August 2011 (a, c, e) and 30 July 2015 (b, d, f)

(a, b) comprehensive mesoscale at 20:00 BT, (c, d) curves of pressure, temperature,
humid and rainfall, (e, f) physical quantity field (vorticity, shading, unit: 10^{-5} s^{-1} ;
divergence, black line, unit: 10^{-6} s^{-1} ; vertical velocity,
red line, unit: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

成强降水在风暴传播方向上的 TBB 冷中心至 TBB 梯度大值区一带原因之一。

2011 年 8 月 15 日 20 时 850 hPa 散度、涡度和垂直速度实况物理量场资料分析(图 6e), 正涡度高值中心区、散度和垂直速度的负值中心区在鲁、豫、冀三省交界处有重叠区, 即该区域具有较有利的动力条件。2015 年 7 月 30 日 20 时 850 hPa 散度、涡度和垂直速度(图 6f), 正涡度高值区、散度和垂直速

度的负值中心区在山东南部有重叠区, 为该区域 MCC 的形成提供了有利的动力条件。“0730MCC”过程中低层的动力条件与“0815MCC”过程差别不大, “0730MCC”过程正涡度中心值、散度和垂直速度负中心值分别为 $35 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $-20 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 和 $-20 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, “0815MCC”分别为 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $-5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 和 $-10 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。涡度高值区、散度和垂直速度的负值中心的重叠区具有显著

的动力条件,对风暴具有明显的强“吸引力”,促使不断地有对流单体生成,生成后在向下风向移动过程中加强,不断替代前面衰减的对流单体,形成明显的后向传播,是 MCC 西南方向发展移动的重要因素之一。

4.2 超低空急流

“0815MCC”对应天气图上没有低空急流,但从雷达风廓线产品(VWP)可分析出中尺度低空急流和超低空急流的形成。“0815MCC”低空急流和超低空急流不属于大尺度系统,因而在常规天气图上没有反应,而在 VWP 中可以看到。该次 MCC 强降水主要出现在天津雷达和济南雷达站之间(图 7a),两站相距约 260 km,可分析两部雷达低空风速变化情况,柱状体为济南雷达和天津雷达之间区域的小时最大降水量(图中偏南风表示为正,偏北风表示为负,下同)。强降水开始前,天津雷达风廓线产品显示,300~600 m 高度基本为东到东北风,而且呈逐渐增强趋势,15 日 18:12 之后风速由 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右增大到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,之后逐渐增大,20:30 前后达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,之后直至强降水结束一直维持急流标准,而 1000 m 高度之上风速较弱,说明超低空东北急流非常强劲。济南雷达 VWP 显示,16 日 01:30 之前近地层为西南风,而且呈逐渐增强趋势;15 日 19:46 之后 600 m 高度风速由 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右增大到 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后逐渐增大,22:20 前后达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,之后直至强降水影响雷达站周围区域时一直维持急流标准,说明强降水期间存在超低空西南急流。此次过程中,中尺度低空急流和超低空急流的形成是强上升气流导致低层气压降低而激发的。由于山东、河南、河北交界处基本一直存在低压区,此区域存在强上升气流,低层的气压较低,使其与其南侧副热带高压之间的气压梯度加大,气压梯度力做功使气流加速,偏南气流加强。同时由于该区域对流发展旺盛,水汽大量凝结产生暴雨,凝结潜热的释放又使低层气压降得更低,南高北低的气压梯度更大,偏南气流加速更快,结果导致低空急流和超低空急流的形成。

强降水影响雷达周围时风向变为偏北风,之后又转为西南风;16 日 01 时在 1000 m 高度之上出现 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南急流,由于强降水前济南雷达上空没有降水目标物,无法探测到低空气流,所以 1000 m 之上低空急流何时建立无法判断。强降水开始前

期,超低空西南气流和超低空东北气流显著加强,两者速度差最大超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随着超低空西南急流的建立,河北南部与山东北部之间低层辐合加强,使得 MCC 得以形成和维持,强降水持续。低层西南风和东北风之间的辐合切变,也为新的对流单体的生成提供了抬升触发机制。

“0730MCC”对应天气图上 925 hPa 急流顶端在徐州站。该次 MCC 强降水主要出现在商丘雷达和济南雷达站之间,两站相距约 280 km,可分析两部雷达低空风速变化情况,如图 7b 所示,柱状体为济南雷达和商丘雷达之间区域的小时最大降水量。强降水开始前,商丘雷达风廓线产品显示,30 日 16 时至 31 日 06 时,600~900 m 高度一直是西南风,16—20 时风速由 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后基本维持在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,31 日 05 时之后降水回波逐渐影响雷达站,风向发生转变,由西南风转为东北风;30 日 20 时前后,1500 m 高度出现西南急流,至 31 日 06 时左右一直维持在 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。济南雷达 VWP 显示,16—20 时风速较小, $4 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向为西南风,20—22 时转为偏北风;22 时至次日 04 时,雷达周围一直存在降水风暴,受降水风暴影响,22 时之后转为东南风,而且风速迅速增大,之后又逐渐减小,04 时之后又转为西南风。强降水开始前期,上游山东西南部地区超低空西南气流逐渐加强,在 MCC 阶段基本维持在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,强降水开始时济南雷达与商丘雷达之间的速度差迅速增大,说明之间区域存在辐合加强;“0730MCC”中前期,济南雷达显示虽然是强劲的东南气流,但与上游的西南急流仍是辐合流场结构;超低空西南急流的建立与维持,有利于条件性不稳定大气层结的加强,同时在山东中南部区域产生辐合,是 MCC 得以形成与持续的主要因素之一。

4.3 风暴上升气流结构

“0815MCC”阶段,济南雷达低层平均径向速度产品显示(图 7c, 7e 和 7g),低层存在明显的辐合线,而且辐合线上存在多个中气旋,同时风暴顶层存在非常强的辐散气流,最大速度差超过 $63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应的风暴顶高基本在 17.5~19 km,说明风暴内部存在非常强的上升气流,形成强烈的抽吸作用。强上升气流使得风暴发展较高,导致较低的云顶亮温;同时风暴顶强烈的辐散,可将冰晶粒子等带到更远的高空,在红外云图上下风方向出现较大的冷云

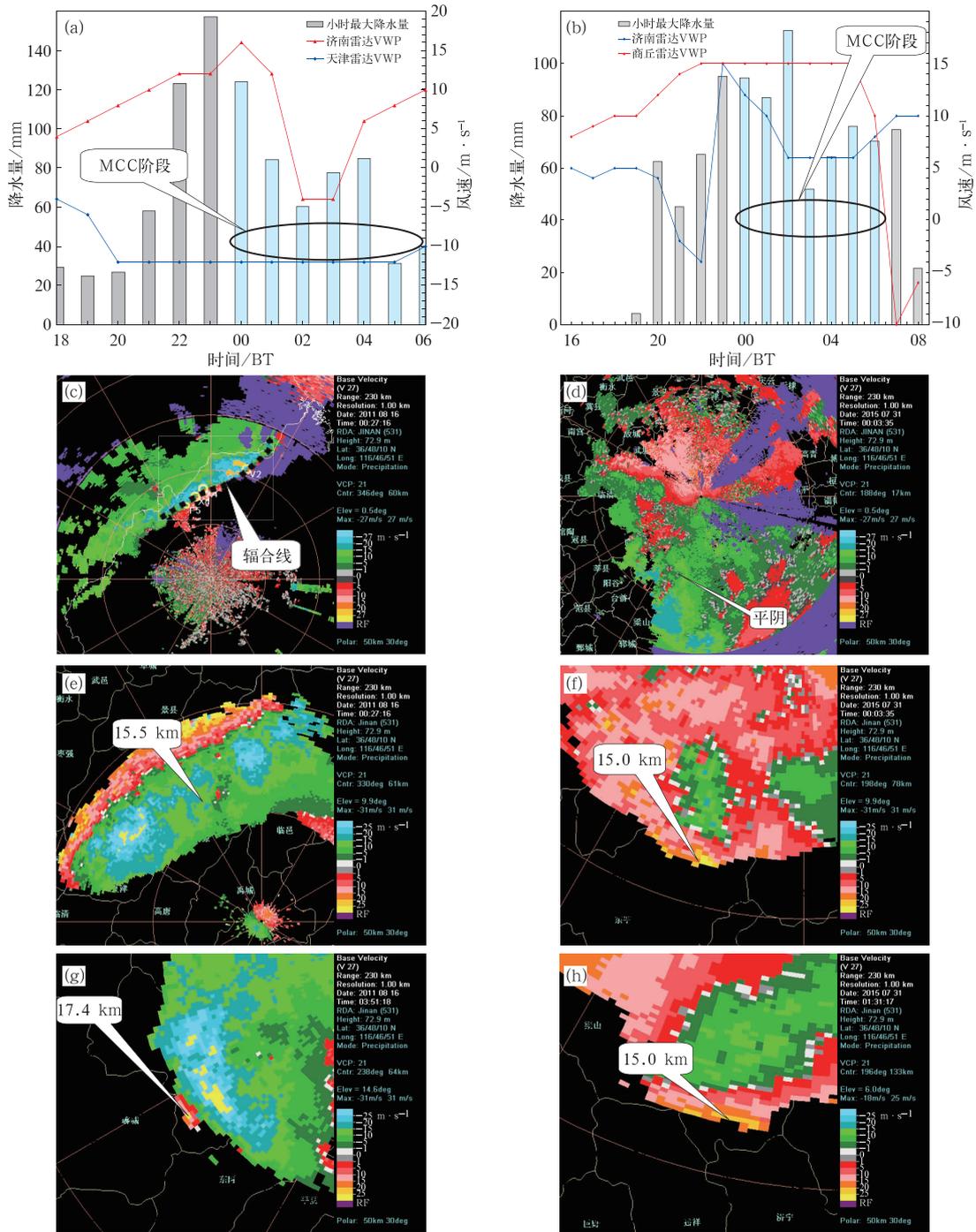


图 7 2011 年 8 月 15—16 日天津雷达(蓝色实线)和济南雷达(红色实线)VWP 超低空风速变化与小时最大降水量(a),2015 年 7 月 30—31 日商丘雷达(红色实线)和济南雷达(蓝色实线)VWP 超低空风速变化与小时最大降水量(b); 2011 年 8 月 16 日济南雷达平均径向速度:(c)0.5°仰角 00:57,(e)9.9°仰角 00:27,(g)14.6°仰角 03:51; 2015 年 7 月 31 日济南雷达平均径向速度:(d)0.5°仰角 00:03,(f)9.9°仰角 00:03,(h)6.0°仰角 01:31

Fig. 7 The precipitation intensity and VWP for Tianjin SA Radar (blue line) and Jinan SA Radar (red line) in 15—16 August 2011 (a), and Shangqiu SA Radar (red line) and Jinan SA Radar (blue line) 30—31 July 2015 (b); the radial velocity of Jinan SA Radar on 16 August 2011: (c) 0.5° at 00:57 BT, (e) 9.9° at 00:27 BT, (g) 14.6° at 03:51 BT, and on 31 July 2015: (d) 0.5° at 00:03 BT, (f) 9.9° at 00:03 BT, (h) 6.0° at 01:31 BT

面积。“0730MCC”阶段,济南雷达低层平均径向速度产品显示(图 7d, 7f 和 7h),低层辐合较为凌乱,而且辐合强度较弱,同时风暴顶层存在明显的辐散气流,最大速度差基本小于 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应的风暴顶高基本在 16 km 左右,说明风暴内部上升气流明显弱于“0815MCC”,所以在卫星云图上表现出较高的云顶亮温和较小的冷云面积。

“0815MCC”低层辐合线明显且辐合强度较强,高层也具有强烈的辐散,能量与动力条件相对集中,使得风暴内部上升气流上升到更高的高度,导致较低的云顶亮温;“0730MCC”低层辐合线较为零乱且辐合强度较弱,呈现“多点开花”局面,分散了能量,使得风暴内部上升气流强度弱于“0815MCC”过程,上升高度低于“0815MCC”过程,云顶亮温高于“0815MCC”过程。

Davis(2001)总结了有利于较强对流降水率的几个条件,包括:具有深厚湿层,因而具有很高的可降水量;中等强度的 CAPE 值;狭长的 CAPE 区域,意味着较低的暖云底和高平衡度;相对弱的垂直风切变。这两次过程探空站点 0°C 层高度都在 5.5 km 以上,而抬升凝结高度都在 0.9 km 左右,这样暖云层很厚,有利于提高降水效率(Davis, 2001; 俞小鼎等, 2012)。从风暴上升气流结构分析,“0815MCC”垂直风切变会明显强于“0730MCC”,强的垂直风切变下高空将冰晶粒子带到云砧处容易造成蒸发从而可能降低水效率,这一点是不利于高降水效率的,这可能是造成这两次 MCC 过程降水差异的重要原因。

5 结 论

(1) 两次 MCC 演变既具有相似性,又存在明显差异。维持时间基本相当,形成于 23 时左右,早上 07 时前后减弱;都是东移对流系统和局地对流系统的合并产生, MCC 形成后基本是西南方向发展移动,有后向传播的特征。降水强度和强降水范围差异明显,“0730MCC”造成的暴雨和大暴雨范围及小时最大降水量明显大于“0815MCC”; MCC 冷云面积和 TBB 差异明显,“0815MCC”最大冷云面积是“0730MCC”的 4 倍左右,“0815MCC”冷云中心 TBB 比“0730MCC”平均低 10°C 。

(2) 正涡度高值区、散度和垂直速度的负值中心的重叠区具有显著的动力条件,对风暴具有明显

的强“吸引力”,风暴演变具有明显的后向传播特征,是 MCC 西南方向发展移动的主要因素之一。

(3) MCC 形成前期,雷达 VWP 出现较强中尺度低空急流和超低空急流,有利于条件性不稳定大气层结的加强,同时上、下游雷达之间的超低空强辐合,为 MCC 的形成与维持提供能量与动力条件。

(4) “0815MCC”阶段,低层辐合线上存在多个中气旋,风暴顶层强烈辐散,使得风暴发展较高,导致较低的云顶亮温;同时风暴顶强烈辐散,可将冰晶等带到更远的高空,在红外云图上出现较大的冷云面积。“0730MCC”阶段,低层辐合较为凌乱且较弱,风暴顶层辐散气流弱于“0815MCC”,所以在卫星云图上表现出高的云顶亮温和较小的冷云面积。相对强的垂直风切变环境下,可将冰晶粒子带到较远的云砧处,容易造成蒸发从而降低降水效率,是造成“0815MCC”降水弱于“0730MCC”的重要原因。

两次过程中, MCC 都是在后半夜生成、加强和成熟,可见夜间对于 MCC 生成、发展是山东地区关注的重点。 MCC 持续时间长,但 MCC 形成到成熟阶段,是强降水的最大时刻,强降水分布在 TBB 冷云中心附近及其等值线非常密集的一侧,这一特征对准确预报、监测和预警该类致灾性暴雨落区、时段是非常有效的,也是提高山东地区防灾减灾能力的一个关键措施和手段之一。

致谢:中国气象局气象干部培训学院俞小鼎教授、南京大学袁慧玲教授对文章提出了许多宝贵意见,中国气象局气象干部培训学院吴洪教授为本文提供了部分资料,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 陈贵川, 谌芸, 张勇, 等, 2013. “12. 7. 21”西南涡极端强降水的成因分析[J]. 气象, 39(12): 1529-1541.
- 陈静静, 叶成志, 陈红专, 等, 2011. “10. 6”湖南大暴雨过程 MCS 的环境流场特征及动力分析[J]. 暴雨灾害, 30(4): 313-320.
- 陈茂强, 顾清源, 汪延波, 等, 2008. 一次西南低涡特大暴雨的中尺度对流云团特征[J]. 高原山地气象研究, 28(4): 66-71.
- 陈永林, 杨引明, 曹晓岗, 等, 2007. 上海“0185”特大暴雨的中尺度强对流系统活动特征及其环流背景的分析研究[J]. 应用气象学报, 18(1): 29-35.
- 陈永仁, 李跃清, 2013. “12. 7. 22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响[J]. 气象, 39(7): 848-860.
- 刁秀广, 孟宪贵, 万明波, 2015. 一次 MCC 红外云图演变特征及成因分析[J]. 山东气象, 35(2): 1-7.
- 刁秀广, 朱君鉴, 刘志红, 2009. 三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性分析[J]. 气象学报, 67(1): 133-146.
- 范俊红, 王欣璞, 孟凯, 等, 2009. 一次 MCC 的云图特征及成因分析

- [J]. 高原气象, 28(6):1388-1398.
- 侯淑梅, 郭俊建, 张磊, 等, 2017. 西风槽与副高相互作用的暴雨过程动热力场结构特征分析[J]. 气象, 43(2):151-165.
- 黄美元, 徐华英, 吉武胜, 1987. 积云并合及相互影响的数值模拟研究[J]. 中国科学(B辑), 17(2):214-224.
- 黄勇, 冯妍, 翟菁, 2016. 对流云合并的国内外研究进展[J]. 暴雨灾害, 35(1):91-96.
- 井喜, 范丛勇, 王雄, 等, 2009. 江苏北部一次由 MCG 引发的致洪暴雨综合分析[J]. 暴雨灾害, 28(1):1-7.
- 井喜, 高青云, 杨静, 等, 2011. 两个不同降水量级的 MCC 对比分析[J]. 高原气象, 30(2):328-338.
- 刘裕禄, 邱学兴, 黄勇, 2015. 发生短时强降雨的对流云合并作用分析[J]. 暴雨灾害, 34(1):47-53.
- 苗爱梅, 董春卿, 张红雨, 等, 2012. “0811”暴雨过程中 MCC 与一般暴雨云团的对比分析[J]. 高原气象, 31(3):731-744.
- 汪小康, 王晓芳, 崔春光, 等, 2012. 用新型探测资料分析武汉一次短时强降雨过程的中尺度对流系统[J]. 暴雨灾害, 31(4):321-327.
- 王宁, 王秀娟, 张硕, 等, 2016. 吉林省一场持续性暴雨成因及 MCC 特征分析[J]. 气象, 42(7):809-818.
- 王宗敏, 丁一汇, 张迎新, 等, 2014. 副高外围对流雨带中的对流-对称不稳定及锋生的诊断分析[J]. 大气科学, 38(1):133-145.
- 韦惠红, 徐双柱, 郭英莲, 等, 2013. 长江中游两次 MCC 过程环境流场及物理条件分析[J]. 气象科技, 41(6):1061-1067.
- 杨晓霞, 王建国, 杨学斌, 等, 2008. 2007 年 7 月 18—19 日山东省大暴雨天气分析[J]. 气象, 34(4):61-71, 138.
- 俞小鼎, 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11):1313-1329.
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3):311-337.
- 曾波, 湛芸, 肖天贵, 2013. 我国中东部地区夏季 MCS 统计分析[J]. 气象, 39(2):180-185.
- 翟菁, 胡雯, 冯妍, 等, 2012. 不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟[J]. 大气科学, 36(4):697-712.
- 张京英, 陈金敏, 刘英杰, 等, 2010. 大暴雨过程中短时强降水机制分析[J]. 气象科学, 30(3):407-413.
- 张晰莹, 吴英, 王承伟, 等, 2010. 东北地区 MCC 雷达回波特征分析[J]. 气象, 36(8):32-39.
- 张迎新, 李宗涛, 姚学祥, 2015. 京津冀“7·21”暴雨过程的中尺度分析[J]. 高原气象, 34(1):202-209.
- 卓鸿, 赵平, 李春虎, 等, 2012. 夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布[J]. 大气科学, 36(6):1112-1122.
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[J]. Meteor Monogr, 28(50):481-526.
- Kane Jr R J, Chelius C R, Fritsch J M, 1987. Precipitation characteristics of mesoscale convective weather systems[J]. J Climate Appl Meteor, 26(10):1345-1357.
- Maddox R A, 1980. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 61(11):1374-1387.
- Smull B F, Augustine J A, 1993. Multiscale analysis of a mature mesoscale convective complex[J]. Mon Wea Rev, 121(1):103-132.