易笑园，陈宏，孙晓磊，等，2018. “7·20”气旋大暴雨中多尺度配置与 MγCS 发展的关系[J]. 气象，44(7)：869-881.

# “7·20”气旋大暴雨中多尺度配置与 MγCS 发展的关系*

易笑园[1]　陈　宏[1]　孙晓磊[1]　王艳春[1]　韩婷婷[1]　李　云[2]

1 天津市气象台，天津 300074

2 国家卫星气象中心，北京 100081

**提　要：** 受北上气旋影响，2016 年 7 月 20 日京津冀地区出现了历史罕见的大暴雨，三地日平均降雨量均创 50 年来历史极值。利用风云二号 F 星(6 min 时间间隔，水平分辨率 5 km)和自动气象站的加密资料、雷达图像及拼图数据资料，结合 NCEP 1°×1°再分析资料，采用叠加分析、TBB 梯度计算、雷达低空风场反演等方法，分析了北方气旋类暴雨的云图特征和多尺度(包括天气尺度和 α、β、γ 中尺度)组织、热力、动力的结构配置；并且针对造成北京、天津城区短时强降水的两个 MγCS，分析了影响它们发生发展的多尺度环境。结果表明：(1)逗点云系中不同部位的热力、动力及水汽配置是：涡旋中心(文中 D 区)与气旋环流中心重合而且是 700 hPa 假相当位温 $\theta_{se}$ 的低值区；在云系尾部云带(C 区)，低空急流带和 $\theta_{se}$ 高值区重合，云带西侧是干冷无云区，云带边缘的光滑地带对应着能量锋区；云系头部(A 区和 B 区)与 700 hPa $\theta_{se}$ 高能区、850 hPa 急流核对应(A 区和 B 区分别对应东北气流和东南气流急流)。急流带内 700 hPa 的 $\theta_{se}$ 高达 78℃，850 hPa 的比湿最大值为 18 g·kg$^{-1}$，最大急流核风速达 30 m·s$^{-1}$，整层可降水量是 70 mm。(2)逗点云系头部嵌着两个 MαCS、一个 MβCS，它们造成降雨的强度为 20～30 mm·h$^{-1}$；而两个 MγCS 的雨强却达 40～70 mm·h$^{-1}$。北京 MγCS-BJ 和天津 MγCS-TJ 发展维持的背景不同：(a)MγCS-BJ 位于涡旋中心——低空急流左前方的对流不稳定区内偏北风与东风形成的地面辐合线上，此辐合线的形成超前于对流系统约 1.5 h。(b)MγCS-TJ 位于云头与涡旋中心之间边缘地带——$\theta_{se}$ 高梯度的能量锋区中，东风风速形成的地面辐合线上。(3)MγCS-TJ 的发展与 MβCS 边缘 TBB 梯度大值区的关系密切，MγCS-TJ 内部具有深厚的中气旋(轴心随高度向西北倾斜)，在旋转速度最强的时刻，其造成的雨强也最大。

**关键词：** 大暴雨，逗点云系，多尺度，TBB 梯度，γ 中尺度对流系统(MγCS)，观测分析

**中图分类号：** P458　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.002

# Multi-Scale Configuration of the 20 July 2016 Cyclone-Induced Severe Torrential Rain and Its Relationship with the Development of MγCS

YI Xiaoyuan[1]　CHEN Hong[1]　SUN Xiaolei[1]　WANG Yanchun[1]　HAN Tingting[1]　LI Yun[2]

1 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Affected by northward cyclone, a rarely-seen severe rainstorm hit the Beijing-Tianjin-Hebei Region on 20 July 2016, resulting in a new extremum of daily mean precipitation amount in this region in the past 50 years. Using the FY-2F satellite data with 6 min interval and 5 km horizontal resolution, radar data and AWS (automatic weather station) data collected every 10 min, NCEP 1°×1° reanalysis data with 6 h interval as well as the methods of multiple data overlay analysis, TBB gradient computation, retrieval

* 国家自然科学基金面上项目(41475050 和 41575049)及天津市气象局“气象预报预警创新团队”培育经费共同资助

2017 年 2 月 28 日收稿；　2018 年 3 月 10 日收修定稿

第一作者：易笑园，主要从事天气预报预警技术及中小尺度灾害天气成因机理的研究. Email：yixy123@sina.com

of radar low-level wind etc., this paper analyzes the cloud image characteristics of cyclonic rainstorm cloud system in northern China and the organization, dynamic and thermodynamic structures of multi-scale systems (synoptic scale and meso-α, meso-β, meso-γ scale convective systems). Two meso-γ scale convective systems (MγCSs), which contribute to the severe rainstorms in the urban areas of Beijing and Tianjin are taken as examples to analyze the relationship between multi-scale ambient configuration and the severe torrential rain events. The results are as follows. (1) The thermodynamic and vapor configurations of different parts of the comma cloud system are: the vortex center (Zone D) coincides with the center of the cyclonic circulation and is a low-value zone of the 700 hPa pseudo-equivalent temperature ($\theta_{se}$). The west side of the tail cloud zone is a dry, cold and cloudless zone. The smooth zone at the edge of the cloud zone corresponds to the energy front zone. The head of the cloud system (Zones A and B) corresponds to the $\theta_{se}$ high-energy zone of the 700 hPa and the jet stream core of the 850 hPa, while the Zones A and B correspond to northeast and southeast jets, respectively. In the jet zone, the $\theta_{se}$ of 700 hPa is as high as 78℃, the 850 hPa specific humidity is 18 g·kg$^{-1}$, the maximum jet core wind speed is 30 m·s$^{-1}$, and the entire precipitable water amount is 70 mm. (2) The comma cloud system has two MαCSs and one MβCS embeded in the head, which are the major contributors to the severe torrential rains, but the rain intensity is only 20—30 mm·h$^{-1}$. However the MγCS in Beijing (MγCS-BJ) and MγCS in Tianjin (MγCS-TJ) both caused extremely heavy precipitation with the intensity getting to 40—70 mm·h$^{-1}$. The two MγCSs are generated and maintained under different multi-scale background conditions: (a) MγCS-BJ is located in the vortex center (Zone D), which is the left front convective instability zone of the low-level jet, combined with the wind direction convergence line formed by the northerly wind and the east wind. The convergence line appears about 1.5 h earlier than the convective system. (b) MγCS-TJ is located in the edge zone between the cloud head and the vortex center. It occurs in the high-gradient energy frontal zone of $\theta_{se}$ and matches the surface wind speed convergence line. (3) The development of MγCS-TJ is closely related to the large-value zone of TBB gradient in the MβCS edge. MγCS-TJ has a deep mesocyclone inside, with the axis tilting to northwest, and the maximum rain intensity occurs at the moment when the rotation speed is the fastest.

**Key words**: severe torrential rain, comma cloud system, multi-scale, TBB gradient, meso-γ scale convective system (MγCS), observation analysis

## 引 言

大暴雨对城市运行和人民生命财产安全构成巨大的威胁，是北方夏季最重要的灾害性天气。陶诗言(1980)在《中国之暴雨》一书中就概括出华北暴雨的特点：强度大，时间集中(“七下八上”)，与地形有密切关系，尤其是短历时降水的强度在我国降水中是罕见的。多年的研究归纳出华北暴雨主要有五种类型：高空槽暴雨(伴有冷锋)、切变线暴雨、气旋(黄河、黄淮)暴雨、冷涡暴雨和北上台风暴雨(《华北暴雨》编写组，1992)。2016年7月19—20日的大暴雨过程属于气旋暴雨类，此类暴雨在近10年京津冀地区极端暴雨事件中均未出现(孙继松等，2015)。另外，此次气旋以罕见的路径北上、正面袭击京津冀地区；在移动过程中还出现跳跃、少动现象，而且在大范围稳定性降雨中伴随着中小尺度强降水。上述因素使准确预报的难度大大增加，主观预报出现了偏差，如预报的降雨量比实际偏小；漏报了主体降水过后再次出现的短时强降水等。因此，有必要从2016年7月19—20日大暴雨(以下简称“7·20”气旋大暴雨)过程入手，凝练科学问题，用观测事实揭示机理，以有效方法剖析成因。

对于北方夏季气旋类暴雨的研究已经取得了一些进展。李修芳(1997)给出了1991年一次黄河气旋发生、发展过程的大尺度环境条件配置模型，并指出：气旋降雨具有连续性降雨和中尺度对流性降雨的特征；杨贵名等(2006)还强调了气旋附近强降水的加强与冷空气侵入有关，且出现在假相当位温线的密集地带；梁丰等(2006)的研究表明：气旋前部的

盾状云系是暴雨的主要落区，落区处具有很强的不稳定性，而且降水分布具有不均匀性及强降水中心与中尺度对流云团有关等。然而，上述工作主要局限于天气尺度的分析。与其他华北暴雨类型的研究相比，气旋类暴雨的研究亟需在中尺度气象学方面开展工作。随着观测资料的丰富和中尺度分析方法的发展，暴雨研究工作的重点已从天气尺度转向中尺度，丁一汇(1994)指出：中尺度系统发展的物理条件与因子、不稳定问题及中尺度系统三维结构等的研究将成为迅速提高暴雨研究和预报水平的重要途径。其他类型暴雨的研究结果表明：α、β、γ 中尺度对流系统与北方重大极端暴雨事件相伴出现，它们是大暴雨的直接制造者。如高空槽类大暴雨：2012 年北京"7・12"特大暴雨(谌芸等，2012；方翀等，2012；孙建华等，2013)；切变类大暴雨：2007 年济南"7・18"大暴雨(杨晓霞等，2008；王瑾等，2009)；9608 号北上台风大暴雨(孙建华等，2006)等。近几年，γ 中尺度系统(meso-γ scale convective system，MγCS)造成的灾害频繁出现，因其尺度小、强度强、预报难度高和危害性大等原因，越来越多地引起人们的重视(易笑园等，2013；孔凡超等，2016；苏爱芳等，2016)。

卫星、雷达、自动站等高时空分辨率的观测资料是开展中尺度研究的重要基础。随着现代卫星遥感技术的迅猛发展，卫星资料被广泛地运用，除了利用红外黑体亮温(TBB)来识别中尺度对流系统外，卫星在监测云团及其变化方面有其优势。如 TBB 水平变化梯度对于对流发展有着预警意义(卢乃锰和吴蓉璋，1997；方宗义和覃丹宇，2006；李云等，2007；喻谦花等，2016；陈渭民，2005)；杜倩等(2013)还发现红外通道与水汽通道亮温差随时间演变与强降水有较好的对应，亮温差的急剧下降可作为重要指标，提前量达 2～3 h。覃丹宇和方宗义(2014)指出，精选的通道、通道组合及演变算法所得参数等判据，可比雷达更早地预警降雨系统的发展。"7・20"气旋大暴雨期间，风云二号 F 星(FY2-F)6 min 间隔的加密资料被成功获取，这为进一步开展细致的分析提供了难得的条件。

本文利用预报监测业务中可获得的观测资料，结合有效可行的分析方法，从气旋类大暴雨独特的云系结构入手展开分析；既关注了低空急流、能量分布等大尺度环境条件，也关注了中尺度环境和系统的演变与成因，以期进一步掌握此类暴雨的落区分布、强度大小、各阶段降水特点，为新资料、新方法在预报业务中的运用提供有价值的参考和借鉴。

## 1　实况及环流背景

对于京津冀来说，"7・20"气旋大暴雨过程自 2016 年 7 月 19 日 01 时开始至 21 日 08 时结束，而京津地区的主要降水时段是在 20 日凌晨到前半夜。天津全市 24 h 平均降水量为 185.9 mm，列 1961 年以来日平均降水量的首位，全市出现大暴雨的监测站占 90.94%，自动站监测到的最大雨强达 77.7 mm・$h^{-1}$，过程降雨量单站极值达359.1 mm，大部地区还出现了 8 级以上大风。北京全市 98% 的监测站雨量超过 100 mm，全市平均降水量为 212.6 mm，单站最大降雨量为 453.7 mm，也突破了历史极值。河北省损失更为惨重，共造成 130 人死亡，110 人失踪，直接经济损失约 163.68 亿元。可见，"7・20"气旋大暴雨过程无论从强度上、范围上，还是灾害性上均属于极端降水事件。

从图 1a 看到：20 日 05 时华北平原受气旋控制，气旋中心位于河北南端与山东交界处，此时中心气压强度为 995.0 hPa。同时来自日本海的西伸高压坝横贯燕山山脉。强回波(＞40 dBz)位于气旋的北部、东部和西南部，呈涡旋回波形态，北部和东部的强回波区域覆盖京津冀及山东，南部强回波贯穿河南—安徽—湖北—湖南等省。

图 1b 表明：20 日 08 时 500 hPa 的天气系统为闭合的低压涡旋，中心强度 576 dagpm，涡旋中心在山西中部对应 850 hPa 上的冷中心(中心温度 16℃)；卫星云图呈现出大尺度逗点云系在成熟阶段的云形特征(图 2)，即云头部为中低云组成的涡旋逗点云系(A 区、B 区)，东北侧高空急流形成的变形场云系，尾部云带是以层云为主的斜压叶状云系(C 区)，且具有光滑边界。逗点云系云头部的少云区对应涡旋中心 D 区。同时，副热带高压中心的 592 dagpm 闭合等高线位于太平洋西部，588 dagpm 等高线位于江苏南部—浙江北部—江西—广西一线。

本文以组合反射率图中雷达回波 45 dBz 定义为中尺度对流系统的外围边界。从图 1c 和 1d 可见：造成天津和北京城区暴雨的对流系统，其尺度为 γ 中尺度，分别记为 MγCS-TJ 和 MγCS-BJ。跟踪回波演变可知，影响天津的时间段主要在 20 日 12—15 时，影响北京的时间段主要在 20 日 18—21

时。图 1e和 1f 也表明:MγCS 造成了第三阶段的强降水。MγCS-TJ 处于主体涡旋回波的边缘,而MγCS-BJ 在涡旋回波中心的弱回波区。它们所在位置具有不同的热力动力环境背景,这决定了两者具有不同的发生发展机制(将在第四部分予以分析)。另外,在涡旋回波以外,还有许多尺度仅为几十千米的中尺度对流系统,对照自动站实况的监测数据发现,它们均造成了短时强降水,甚至短时大风

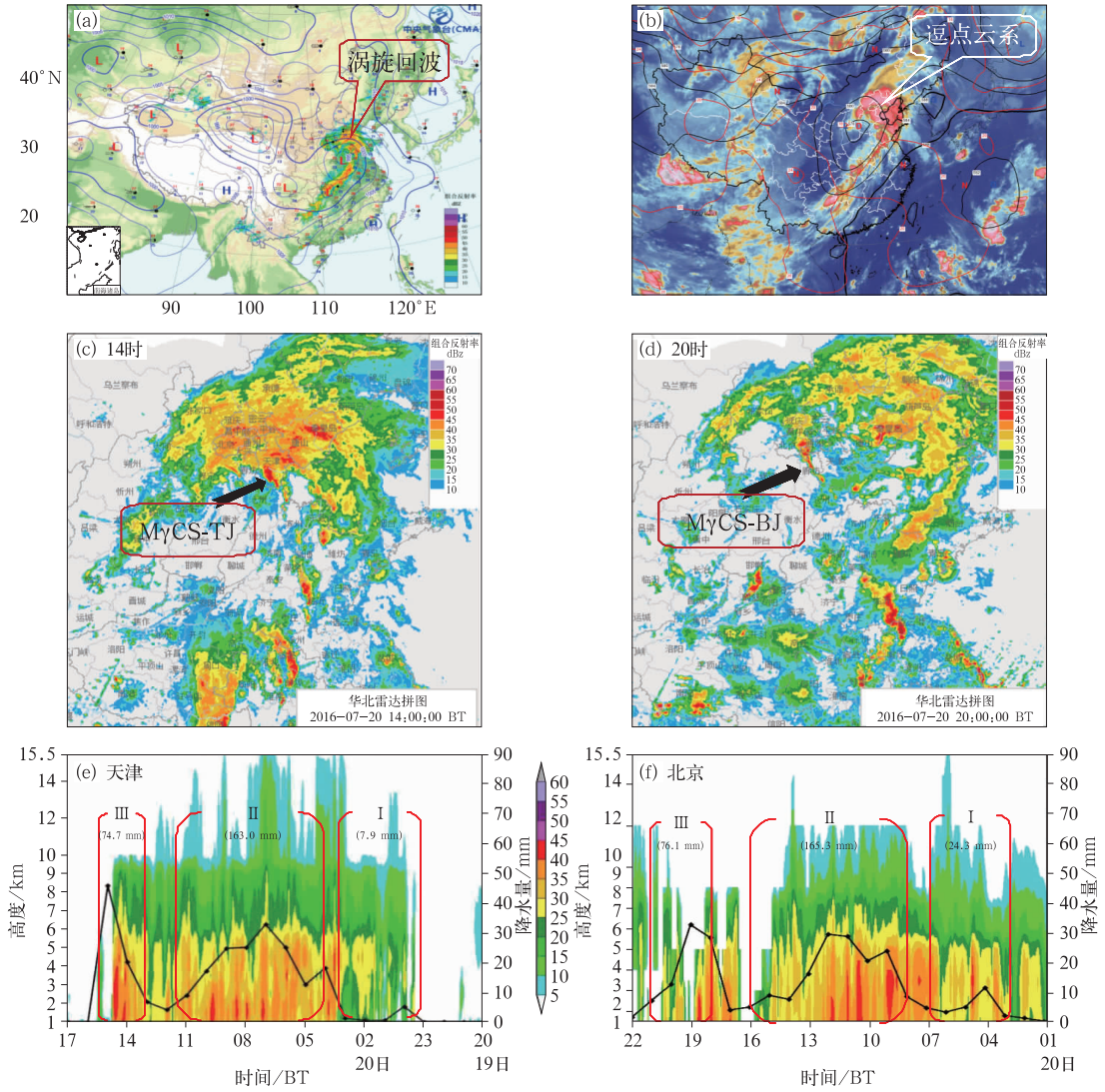


图 1 2016 年 7 月 20 日(a)05 时海平面气压场与雷达回波叠加图,(b)08 时 500 hPa 高度场与红外云图叠加图,(c)14 时、(d)20 时雷达组合反射率拼图(黑色箭头所指是分别造成天津、北京强降水的 MγCS),(e)经过天津市区(19 日 20 时至 20 日 17 时)和(f)北京城区(20 日 01—22 时)雷达回波(阴影,单位:dBz)、小时降雨量(曲线)的时间序列(图 1e 和 1f 中Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ分别对应天津:00—03 时,04—11 时,12—15 时和北京:01—07 时,08—17 时,18—21 时)

Fig. 1 (a) Sea level pressure and radar echo at 05:00 BT 20, (b) geopotential height field and infrared cloud image at 500 hPa at 08:00 BT 20, (c, d) radar composite reflectivity at 14:00 BT and 20:00 BT 20 July 2016, respectively (Black arrows point to the MγCSs causing heavy rainfall); (e, f) temporal profiles of radar echo and hourly rainfall (curve, unit: mm) over Tianjin during 20:00 BT 19 to 17:00 BT 20 and Beijing during 01:00 BT to 22:00 BT 20 respectively (In Figs. 1e, 1f, Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ represent rainfall stage of Tianjin during 00:00—03:00 BT, 04:00—11:00 BT, 12:00—15:00 BT and rainfall stage of Beijing during 01:00—07:00 BT, 08:00—17:00 BT, 18:00—21:00 BT, respectively)

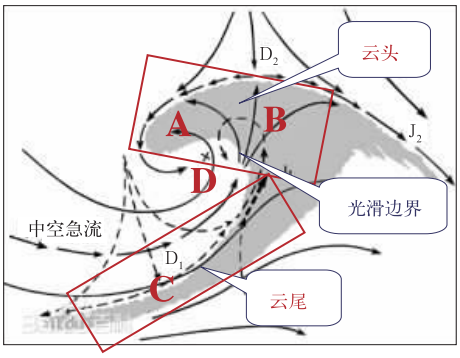


图 2　逗点云系气流、分区概念图

Fig. 2　Comma cloud airflow and partition concept illustration

等恶劣天气。如出现在济宁和合肥附近的对流系统分别造成 3 h 的 28.0 和 32.1 mm 的强降水；徐州附近的造成 3 h 内 45.1 mm 的强降水，而影响北京城区的 MγCS-BJ，造成降雨量达到 78.8 mm，雨强为 46.1 mm・$h^{-1}$。因此，除了探究大范围降水的成因外，关注中小尺度对流系统的发展、维持机制是提高预报预警精准率的关键。

从图 1e 和 1f 得到如下特点：(1)降水有阶段性，第二阶段降水持续 7～9 h，最强回波达到 40～45 dBz，且质心较低(3 km 左右)，雨强在 20～30 mm・$h^{-1}$，天津和北京降雨总量分别为 165.3 和 163.0 mm；(2)第三阶段降水时间约为 3 h，但此时雨强明显高于第二阶段，达到 40～70 mm・$h^{-1}$；天津城区挂甲寺自动站测得的雨强达到 77.7 mm・$h^{-1}$；北京城区自动站最大雨强为46.1 mm・$h^{-1}$；40 dBz 强回波核厚度都达到 5～7 km 高，表现出明显的强对流特征。(3)回波具有等间距、条缕状形态。

## 2　逗点云系各部位的大尺度动力、热力配置

将“7・20”气旋大暴雨逗点云系与大尺度热力动力场叠加的意图是：构建云图与环境条件的对应关系，从而掌握云图不同部位的热力动力背景，使预报员通过云图的不同部位及时推断该位置的环境场情形，从而借助卫星云图弥补天气分析图间隔过大的缺陷，有效地满足监测对流系统快速变化的需要。

图 $3a_2$，$3b_2$，$3c_2$ 为 20 日 08—20 时，气旋、副热带高压(以下简称副高)和低空急流等天气系统的配置图，“●”为自 19 日 20 时至 20 日 20 时地面气旋中心的位置，间隔 3 h，不同颜色代表不同时刻。从中可见，副高 584 dagpm 等高线稳定少动，气旋不断加强北移，气旋与副高之间的气压梯度加大，等高线加密。根据梯度风原理，副高与气旋之间的风速必然加大，即低空急流的风速加大。气旋在北上过程中，出现两次跳跃，一次是 19 日 20—23 时，另一次是 20 日 02—05 时。雷蕾等(2017)认为：此次中低层低涡系统(地面气旋)在 19 日夜间快速发展加强，这不仅与高低空系统构成的耦合作用有关，同时强降水造成的潜热反馈过程也起到了重要作用。在这段时间，200～300 hPa 高空槽异常加深并向南伸展，高空位涡沿着等熵面南下，形成对流层上层正位涡异常高区，它叠加在中低层锋区上空造成气旋的快速发展；而低涡的发展加强了西南暖平流，使低压气旋向暖区快速移动。同时，根据大尺度垂直运动、地面降水资料估算的大尺度凝结潜热和对流潜热分布说明：对流层中层暖平流的进一步增强很可能与潜热加热过程有关。

20 日 08—20 时，气旋少动，其中心一直停留在河北邢台附近，而这段时间京津地区降雨量最大(图 1e和 1f)。伴随着气旋强度的变化，850 hPa 低空急流带的风速值随之变化明显。19 日 20 时气旋闭合中心气压值为 997.5 hPa；20 日 02 时，中心加强到 995.0 hPa，低空西南风急流内的 26 m・$s^{-1}$强风速带贯穿湖北—河南—安徽—山东一线，最大风速加强为 30 m・$s^{-1}$。从 12 m・$s^{-1}$风速分布表明：在气旋东北部还有一支东南风低空急流，由黄海南部经渤海流向京津地区。

针对低涡中心附近温度场的配置(图略)可知：随着气旋从发展阶段(19 日 20 时)到旺盛阶段(20 日 08 时)再到消亡阶段(20 日 20 时)，在对流层高层 200 hPa，涡旋中心始终与暖中心相配合；而中层 500 hPa，在气旋在发展—旺盛阶段是暖心特征(20 日 08 时)，而其他两个阶段均是冷心，即气旋中心附近的温度场是先前暖后冷，到暖，再到全冷演变的；在低层(850 hPa)，气旋中心附近的温度场是从全暖，到前暖后冷，再到全冷的。也就是说：在气旋发展—旺盛阶段，中层先于低层中心变暖，而在旺盛—消亡阶段，低层先于中层中心变冷，这一现象与降水时间长、冷却作用有关。

图 $3a_1$，$3b_1$，$3c_1$ 为 20 日 08—20 时，红外云顶亮温 TBB 的分布(＜－22℃，间隔 5℃)，可见“7・20”气旋大暴雨逗点云系(阴影)，其与 700 hPa 假相当

位温 $\theta_{se}$(虚线)叠加看到:72℃(黑色粗虚线)作为冷暖、干湿分界线,72℃线呈"入"字型反映了能量场的分布。对应逗点云系概念图(图 2)可知不同位置的热力动力场分布:

(1) D 区:对应气旋中心、无云或少云区,是假相当位温低值区,属于云图上斧头状暗区的北端,对应干冷下沉空气(杨贵名等,2006),其边缘与云头区交界,边界光滑,假相当位温线密集。急流环绕D区,

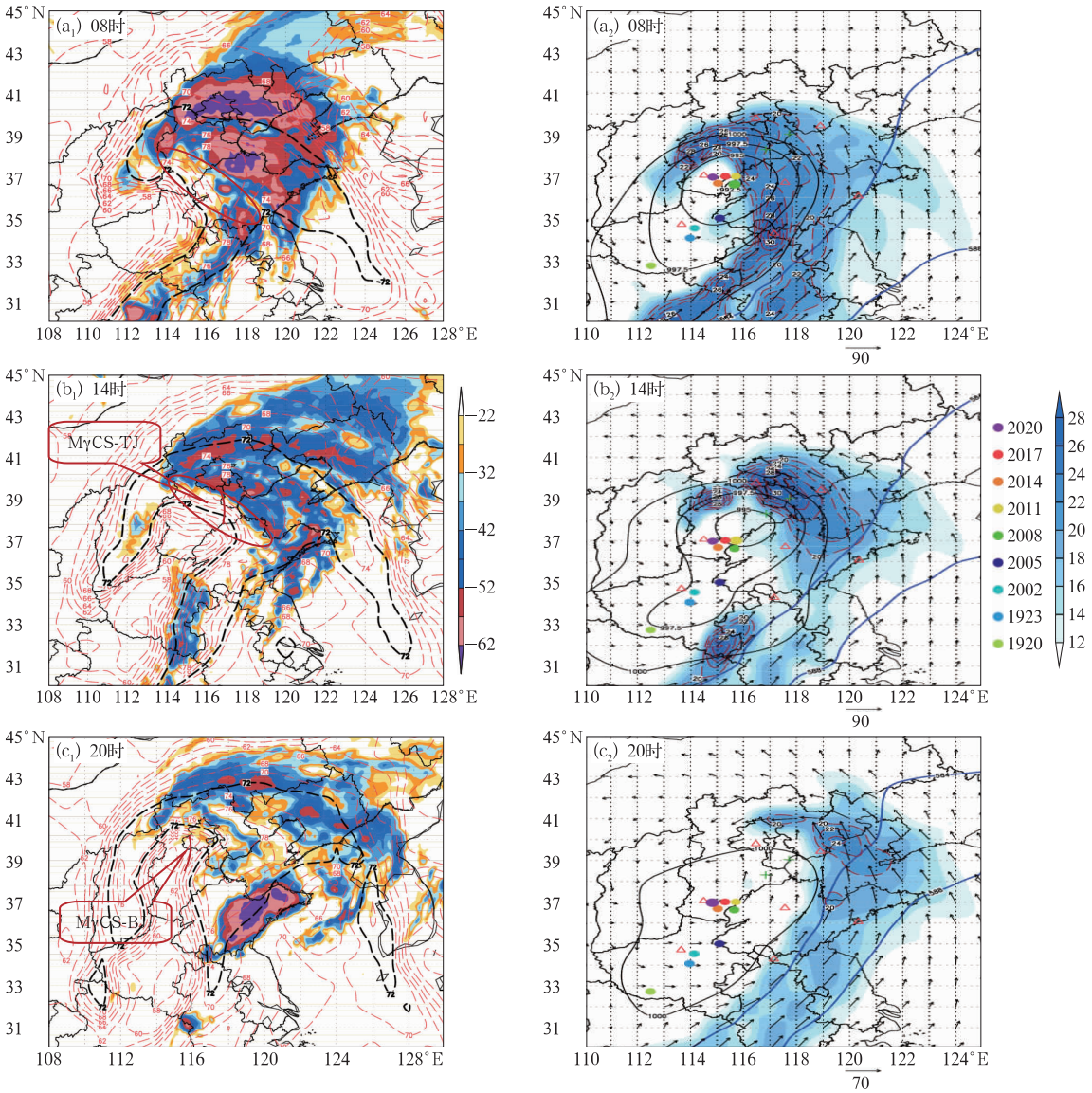


图 3 2016 年 7 月 20 日 08—20 时($a_1$,$b_1$,$c_1$)700 hPa 上假相当位温 $\theta_{se}$线(虚线,单位:℃)、TBB(阴影,单位:℃)(黑色粗虚线为 72℃,棕色线段标出北京和天津 MγCS 活动位置);($a_2$,$b_2$,$c_2$)850 hPa 上风场(箭头)、等风速线(>12 m·s$^{-1}$为阴影,>20 m·s$^{-1}$为虚线)、海平面和在 500 hPa 的等高线(<1000 和>584,单位:dagpm)

(不同颜色●为气旋中心位置:19 日 20 时开始,间隔 3 h)

(a)08 时,(b)14 时,(c)20 时

Fig. 3 ($a_1$, $b_1$, $c_1$) FY-2F TBB (shadow, unit: ℃) and $\theta_{se}$ field (dashed line, unit: ℃) at 700 hPa (black dashed line: $\theta_{se}$=72℃, position of MγCSs: brown line); ($a_2$, $b_2$, $c_2$) wind field (arrow), isotach (shadow, > 12 m·s$^{-1}$; dashed line, > 20 m·s$^{-1}$) at 850 hPa, sea level pressure and contour lines at 500 hPa (<1000 and >584, unit: dagpm) (colored: cyclone center with 3 h interval) at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 20:00 BT 20 July 2016

分别有东北风、东南风急流，东部有偏南风急流。

（2）云头部 A 区和 B 区：对流最强的区域在 08—14 时，云头部有大片 TBB＜－52℃的区域，形成主要降水云区，也是急流核出现的区域。A 区低层盛行西北风气流，而 B 区东南风气流占主导，而且都处于假相当位温 $\theta_{se}$ 的高值区，即暖湿的高能地带，A 区和 B 区分别达到 74℃、78℃，且位于气旋的右方。然而，A 区东北风气流的性质由－72℃线决定，－72℃线包围之外的气流是低能干冷的，以内的具有高能暖湿的特征。

（3）云尾 C 区：08 时（图 3a），气旋达到最强，闭合中心气压降为 992.5 hPa。C 区对应急流带和假相当位温高能区，急流带上有相对独立的大风速核，850 hPa 风速达 28～30 m·s$^{-1}$，700 hPa 的假相当位温值达到 78℃。C 区内有多个对流系统发展并随大尺度西南风气流移动。

## 3　多尺度特征及 MγCS 生成和维持机制

中尺度对流系统（MCS）已成为暴雨研究的重要部分。但在已有的气旋类暴雨的研究中，却少有提及（丁一汇，1994；李修芳，1997；梁丰等，2006；杨贵名等，2006）。那么，"7·20"气旋大暴雨中是否也活跃着 MCS 呢？它们存在于逗点云系的哪个部位？不同尺度的 MCS 之间是独立存在的，还是有关联？

### 3.1　逗点云系中的多尺度对流系统

从20日03—14时逗点云系的演变（图4）和图1e，

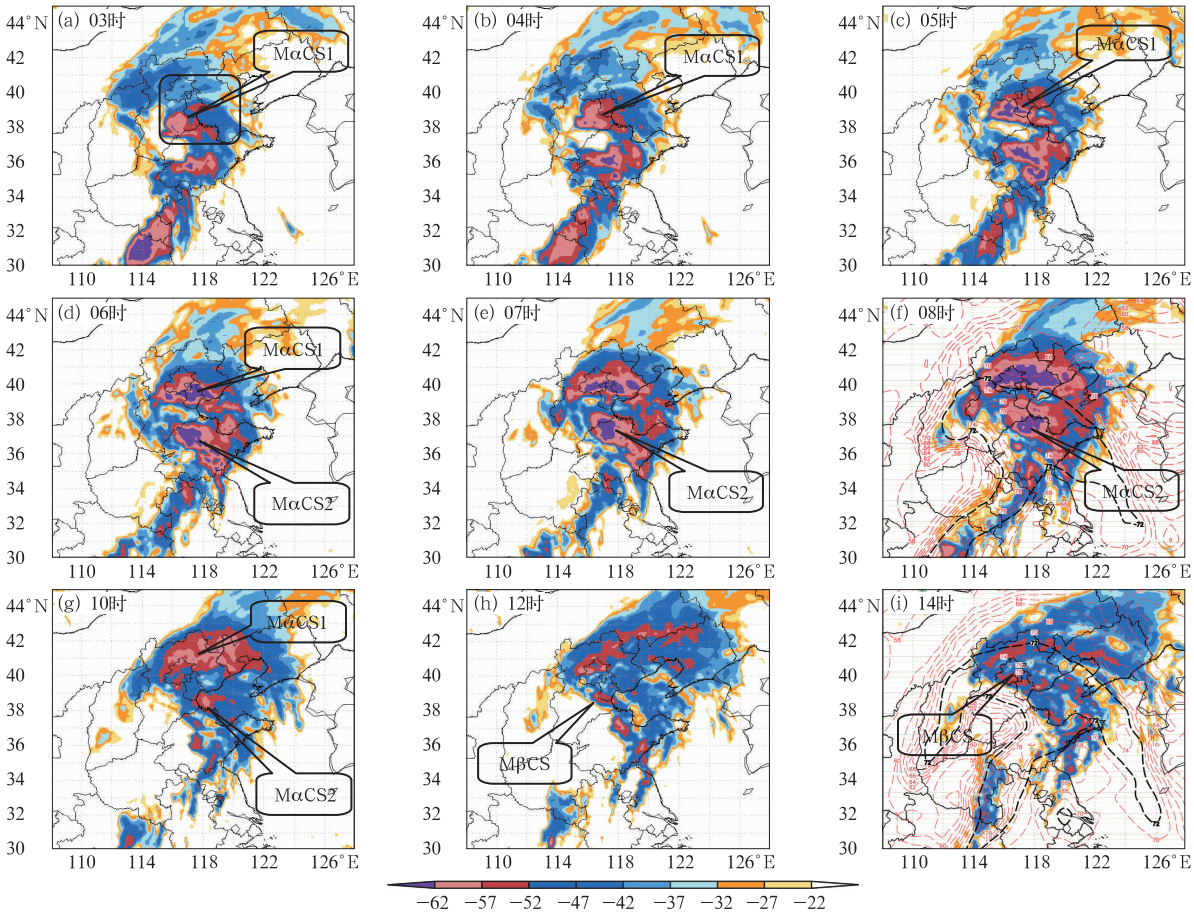


图 4　2016 年 7 月 20 日 03—14 时 FY2-F 星云顶亮温 TBB

（阴影，单位：℃，TBB＜－52℃，线圈出的区域为中尺度对流系统，红色；虚线：700 hPa 上假相当位温线，单位：℃）

Fig. 4　FY2-F satellite TBB distribution during 03:00－14:00 BT 20 July 2016

（shadow, unit: ℃, area with TBB ＜ －52℃ is the mesoscale convective system, dashed line: 700 hPa $\theta_{se}$ line, unit: ℃）

1f 可知，这段时间是降水量最大的阶段。在第一、第二阶段，北京、天津的降雨量分别达到了 170.9 和 189.6 mm。在 03—08 时，有两个 MαCS 发展并先后影响京津冀地区；从强度看，05—08 时，MαCS1、MαCS2 强度最强，此时 TBB 值均降低到－62℃ 以下，极值降至－67℃；从生命期看，两个 MαCS 都出现在成长—旺盛期（图 3$a_1$ 表明 08 时气旋最强，中心气压最低）。MαCS2 自 09 时开始范围缩小，至 10 时（图 4g）减小为 β 中尺度对流系统。10—14 时，MβCS 存在云头 B 区的边缘地带，其处于假相当位温 72℃线附近高能一侧，并随云系向西北移动。另外，在气旋发展期和削弱期，云尾部 C 区，03—05 和 17—20 时（图 3$c_2$）都有 MαCS 活动。

从大范围 TBB 演变看，“7・20”气旋大暴雨过程的 TBB 值偏高，多高于－37℃。云系发展高度低，特别是气旋达到旺盛以后，云系内以层云为主，对流区范围快速缩小。FY-2F 星 TBB 与雷达组合反射率进行叠加（图 5）展示了尺度更小的 MγCS 与 MβCS、MαCS 的相互关系。

跟踪 MγCS-TJ 移动轨迹，其活动范围在 37.5°～40°N、117°～117.5°E。从图 5a～f 可见：在 10:30，其在河北沧州以南形成后，一路北上，至 11:36

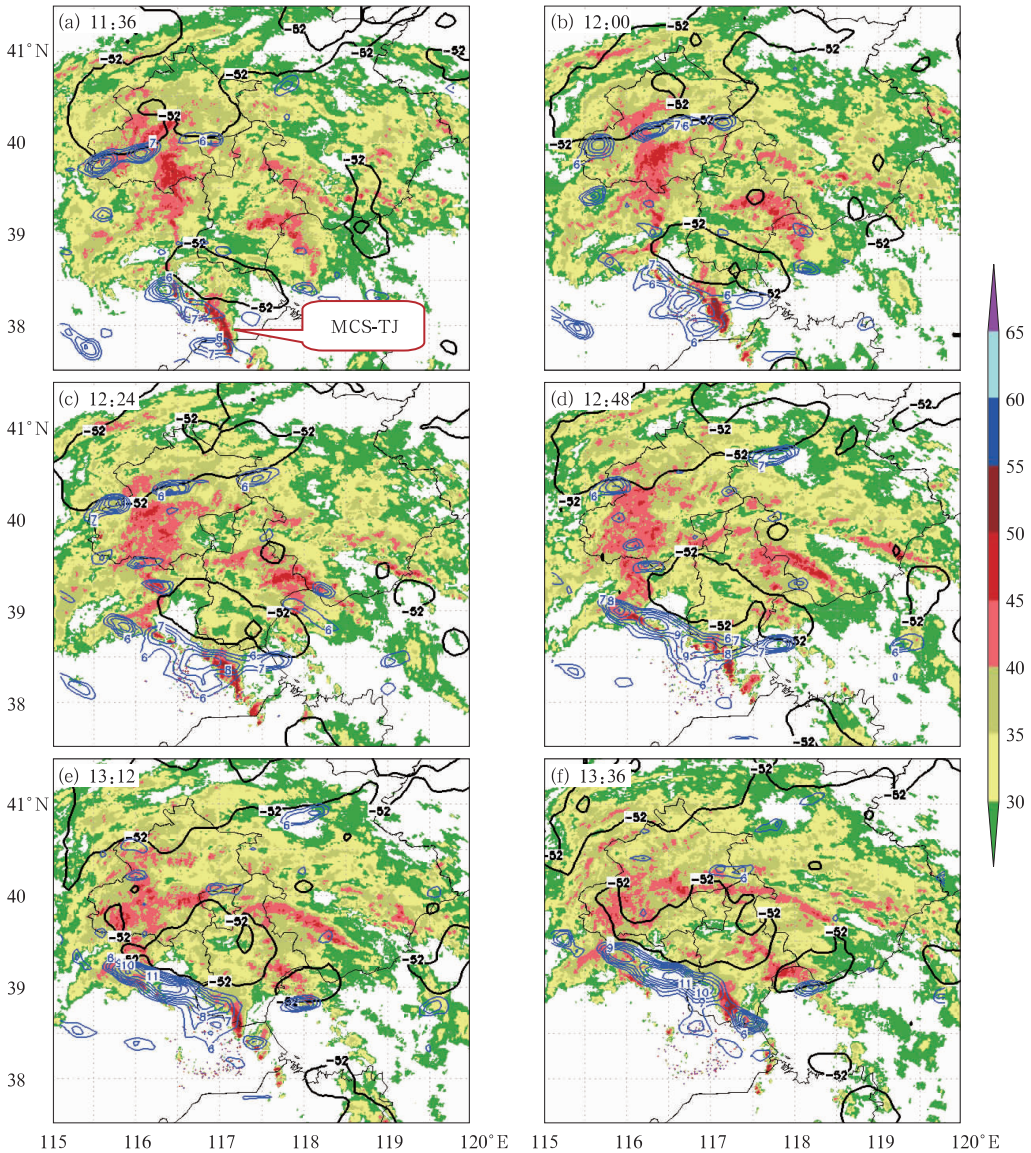


图 5 2016 年 7 月 20 日 11:36—13:36 雷达组合反射率 CR（阴影，单位：dBz）与 TBB 梯度大值区叠加图

（蓝色细实线，梯度＞6，间隔 1，单位：℃・$km^{-1}$；黑粗线，TBB 为－52℃线）

Fig. 5 Radar composite reflectivity (shadow, unit: dBz) and TBB gradient during 11:36－13:36 BT 20 July 2016

(blue thin line, unit: C・$km^{-1}$; thick black line, TBB line at －52℃)

（图 5a），临近天津地区快速加强，于 12:48（图 5d）开始进入天津境内，并于 13:48—14:36 时经过天津城区，造成强降水，总降水量达 88.1 mm。在靠近 MβCS 附近，不断有对流单体生成、发展，并随整体云系移动，而且 MγCS 始终处于 TBB 梯度高值区中，这一特征在一些研究（喻谦花等，2016；孙建华等，2005；杜倩等，2013）中也曾提及。受篇幅制约，这里仅对影响天津、北京的 MγCS 做详细的分析。MγCS-TJ 造成罕见的短时强降水，小时雨强达 77.1 mm·h$^{-1}$，这与其内部结构有着密切关系。在 13:48（图 6a$_1$，6b$_1$，6c$_1$），天津城区南部有一个深厚的双涡式速度对，该结构对 MγCS-TJ 强度的加强和长时间维持起着重要作用。正径向速度强中心两侧各有一个负径向速度强中心，约在 1.5 km 高度处的旋转切变度都是 0.003 s$^{-1}$，旋转速度 12 m·s$^{-1}$，中心距分别为 9.0 和 8.5 km；中气旋厚度为 0.6～3.3 km；从 0.5°、1.5°、2.4°仰角的图中对比可知：中气旋中心由低到高，略向西北倾斜，即旋转轴

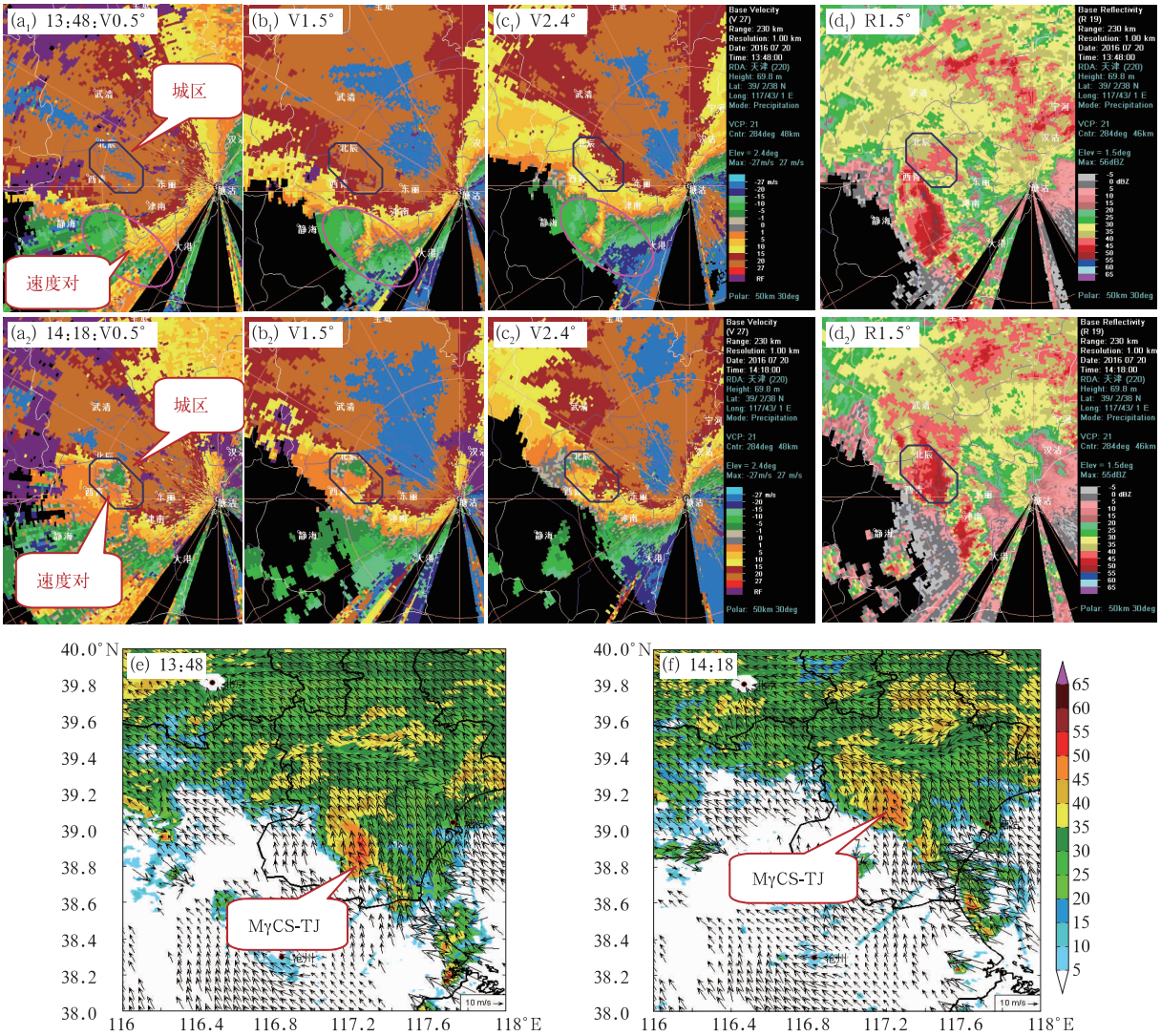


图 6　2016 年 7 月 20 日 13:48（a$_1$，b$_1$，c$_1$，d$_1$，e）和 14:18（a$_2$，b$_2$，c$_2$，d$_2$，f）塘沽多普勒雷达 0.5°（a），1.5°（b），2.4°（c）仰角的径向速度，1.5°仰角的反射率（d，单位：dBz），2 km 雷达低空风场反演（e，f，单位：m·s$^{-1}$）

Fig. 6　Radial velocity by the Tanggu Doppler Radar respectively at elevation 0.5° (a), 1.5° (b) and 2.4° (c) and echo reflectivity (d, unit: dBz) at elevation 1.5° at 13:48 BT (a$_1$, b$_1$, c$_1$, d$_1$, e) and 14:18 BT (a$_2$, b$_2$, c$_2$, d$_2$, f), radar horizontal wind 3D retrieval (e, f, unit: m·s$^{-1}$) at the height of 2 km on 20 July 2016

向西北倾斜。可见，13:48 中气旋的强度已经很强，回波反射率强度也达到 50 dBz 以上。追踪该中气旋的演变看到：在 0.5 h 之前即 13:18(图略)，气旋式速度对首先在天津静海和大港交界的 2.8～3.9 km 高空首先形成，而后向低层发展，逐步形成双涡式结构。从图 $6a_2$，$6b_2$，$6c_2$ 可见：在 14:18，即在中气旋生成后的 1 h，50 dBz 的强回波进入天津城区，此时速度对仍然存在，厚度和旋转速度均维持不变，只是速度对的双涡式结构演变为辐散式的反气旋，中心距增大到 11.4 km，说明此时中气旋强度有减弱的趋势。图 6e 表明：13:48 MγCS-TJ 随东南风气流向西北移动，与此同时，中气旋保持自我运动。综上所述，MγCS 强度和维持与其内部动力结构相关联，速度对结构及其演变的识别和追踪是对强降水的临近预警是有价值的指标。

### 3.2 多尺度环境对 MγCS 的影响

MγCS 作为中尺度研究中的最小尺度，其发生发展与多尺度环境的关系如何？针对造成天津、北京短时强降水的 MγCS 进一步加以分析。

根据 MγCS-TJ 的活动区域(37.5°～40°N、117°～117.5°E)和生命期(12—15 时)，其位置在涡旋回波边缘，即逗点云系 D 区与 B 区交界处附近。由图 7a可见：活动区域内，从 850～450 hPa，假相当位温线非常密集，从 64℃增大到 78℃，梯度为 1.4℃/纬度。根据能量锋生作用可知，该区域冷暖空气交汇，有利于上升运动的加强。另外，850 hPa 以下，存在着东风风速的辐合区，东风分量由 10 m·s$^{-1}$ 递减到 4 m·s$^{-1}$。图 7b 表明：MγCS-TJ 在 850 hPa 急流带内，且湿度条件好，整层可降水量为 60～65 mm。

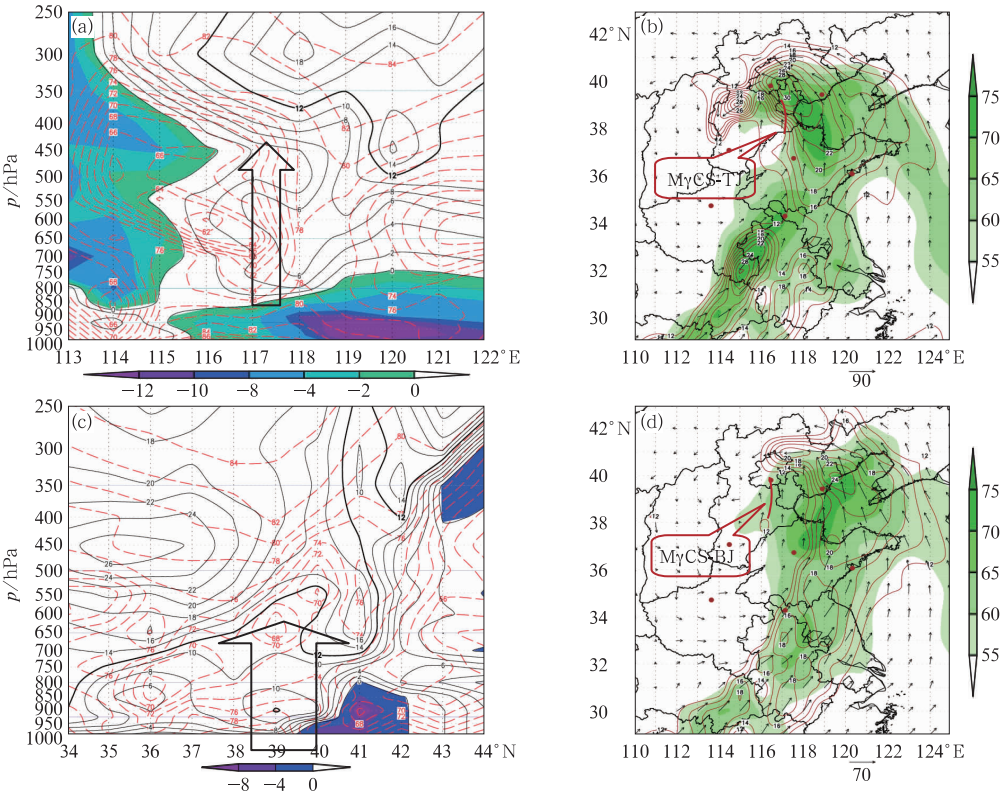


图 7 2016 年 7 月 20 日(a，b)14 时和(c，d)20 时(a，c)沿 MγCS-TJ 和 MγCS-BJ 活动区 38°N、116.5°E 假相当位温(红虚线，单位：℃)、东西风(a，西风为黑线，东风为阴影，单位：m·s$^{-1}$)和南北风(c，南风为黑线，北风为阴影，单位：m·s$^{-1}$)的垂直剖面(箭头为不稳定区)，(b，d)整层可降水量(阴影，单位：mm)和 850 hPa 急流带(风速>12 m·s$^{-1}$，实线，间隔 2 m·s$^{-1}$)

Fig. 7 (a, c) Vertical cross-section of $\theta_{se}$ (red dashed line, unit: ℃) and $u$ (a, $u$: black line, $-u$: shaded area, unit: m·s$^{-1}$), $v$ (c, $v$: black line, $-v$: shaded area, unit: m·s$^{-1}$) through 38°N and 116.5°E (arrow is unstable area); (b, d) precipitation in the whole layer (shaded area, unit: mm) and jet belt at 850 hPa (wind speed > 12 m·s$^{-1}$, solid line, interval 2 m·s$^{-1}$) at (a, b) 14:00 BT and (c, d) 20:00 BT 20 July 2016

从图 8 看：在 MγCS-TJ 附近存在着一条东南风风速的辐合线，辐合线以东风速明显强于其西侧。图 8e 也证实在 10—14 时，天津城区观测站记录的风速明显加强。

MγCS-BJ 发生、发展、移动区域在 39.0°～40.0°N、116.0°～116.5°E，生命史时间为 18—21 时。影响北京城区的时间段是 18—21 时，其位置在涡旋回波中心，即逗点云系的 D 区（图 2），云图上的暗区为冷空气的下沉区，同时此区域位于低空急流带的左前方，即不稳定区（孙淑清和翟国庆，1980；刘鸿波等，2014）。沿 116.5°E 做假相当位温和南北风的经向剖面，得到图 7c，从中可见：自 1000～600 hPa，假相当位温值随高度减小，从 80℃降低到 70℃，说明该区域为对流不稳定区。同时由图7d看

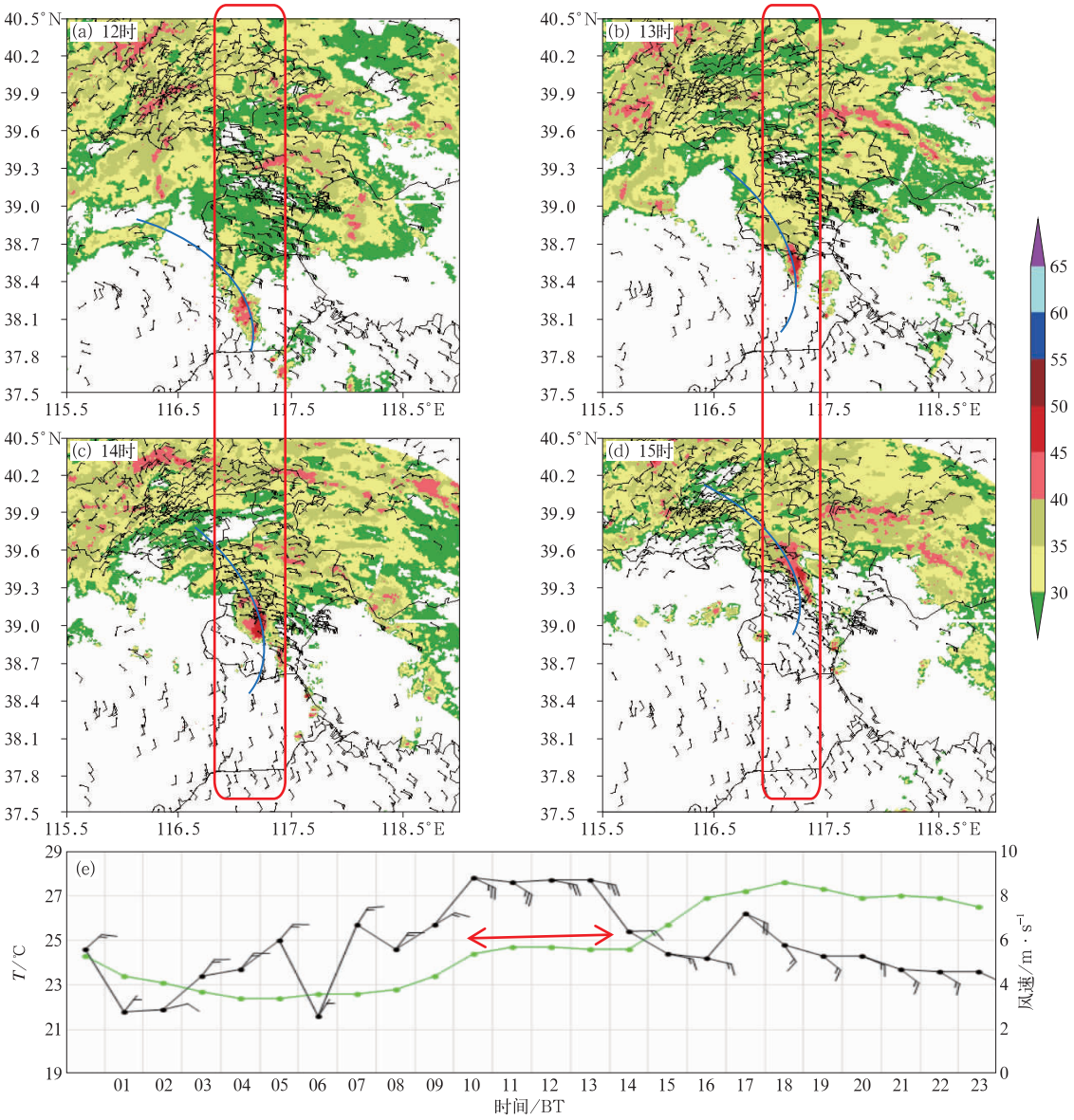


图 8　2016 年 7 月 20 日 12—15 时（a，b，c，d）加密自动站风场与同时刻 2 km 高的雷达反射率（阴影，单位：dBz，蓝线为辐合线，实框为辐合线位置变化范围），（e）20 日 00—23 时天津监测站（54527）风向风速、温度演变图

Fig. 8　(a, b, c, d) Surface wind and radar reflectivity at height of 2 km (shadow, unit: dBz, blue line is convergence line, frame is the change range of convergence line) in 12:00—15:00 BT 20 July 2016, (e) evolutions of temperature, wind direction and speed at Tianjin Station (No. 54527) from 00:00 BT to 23:00 BT 20 July 2016

到：此时整层可降水量维持在 60～65 mm，这为对流的发展提供了很好的湿度条件。由图 9 反映的风场情况可见：随着气旋北上，云头部 A 区（图 2）存在气旋性旋转气流，在地面上形成东北风，其与原来的东南风形成风向辐合线，小的对流单体正是沿着这条辐合线产生且加强的。此辐合线超前于对流单体约1.5～2 h 就出现了。北京城区风向风速序列记录了 18 时风向由东风转为东北风，风速由4～6 m·s$^{-1}$减小为 2 m·s$^{-1}$（图 9e）。

由于此次大暴雨过程是以稳定降水为主，降水时间长，地面湿度基本饱和，在自动站得到的地面温度、湿度（露点）、假相当位温（能量）的分布全天几乎没有变化，呈现出东南高、西北低的趋势（图略）。

## 4 结 论

利用 FY-2F 卫星、雷达、自动气象站等加密资料，结合 6 h 间隔的 NCEP 1°×1° 再分析资料，采用了 TBB 梯度计算、雷达低空风场反演以及多种资料叠加综合分析等方法，针对“7·20”气旋大暴雨逗点云系各部位的多尺度（包括组织、动力、热力）配合情形加以分析，并针对两个分别造成北京、天津城区强

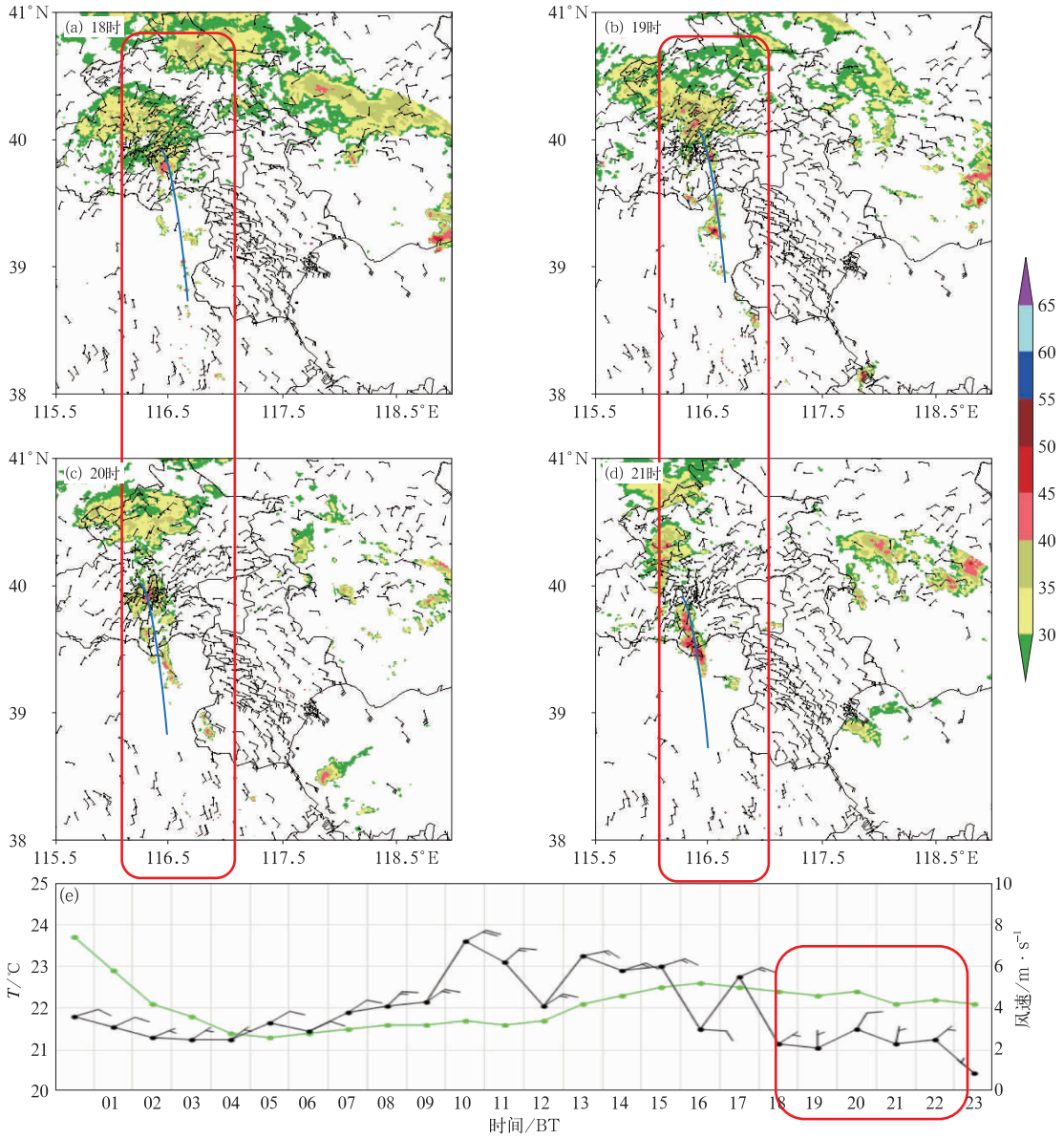


图 9 同图 8，但为 18—21 时，图 9e 为北京监测站（54511）

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for the period of 18:00—21:00 BT July 2016; (e) the evolutions of temperature, wind direction and speed at Beijing Station (No. 54511)

降水的 MγCS，分析了不同的多尺度环境配置对它们发生发展的影响。得出以下主要结论：

（1）卫星云图及其与环流背景图的叠加不仅清楚地展现了气旋逗点云系形态，提供了掌握不同天气系统演变情形的有效途径，如干冷气流下沉区对应暗区、锋区对应光滑边界的判别。云系涡旋中心与低压气旋环流中心重合并且是假相当位温的低值区；云系尾部云带与低空急流位置重合，其内部高湿、高能且风速不连续。

（2）逗点云系在发展至成熟阶段，云头区嵌着 α、β 中尺度对流系统，它们是造成大暴雨的主要系统，雨强仅为 20～30 mm・$h^{-1}$。在发展和消弱期，云尾 C 区有 α 中尺度对流系统出现。MγCS 伴随着 MβCS 存在于其 TBB 梯度高值区中。

（3）位于云系涡旋中心的北京 MγCS-BJ 和涡旋边缘的天津 MγCS-TJ 均造成了短时强降水。两个 MγCS 均发展维持于充沛水汽和不稳定背景下，而区别在于：(a) MγCS-BJ 的初生加强是由于其处于涡旋中心、低空急流左前方对流不稳定区，同时配合西北风与东风的风向辐合线，此辐合线超前于对流系统的初生近 1.5 h；(b)处于涡旋边缘的 MγCS-TJ，其发生发展于高空能量锋区中（锋生作用有利于上升运动），同时有地面风速的辐合线配合。

## 参考文献


陈渭民，2005. 卫星气象学：第 2 版[M]. 北京：气象出版社.

谌芸，孙军，徐珺，等，2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考（一）观测分析及思考[J]. 气象，38(10)：1255-1266.

丁一汇，1994. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. 气象学报，52(3)：274-284.

杜倩，覃丹宇，张鹏，2013. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的 FY-2 卫星观测分析[J]. 气象，39(7)：821-831.

方翀，毛冬艳，张小雯，等，2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J]. 气象，38(10)：1278-1287.

方宗义，覃丹宇，2006. 暴雨云团的卫星监测和研究进展[J]. 应用气象学报，17(5)：583-593.

《华北暴雨》编写组，1992. 华北暴雨[M]. 北京：气象出版社.

孔凡超，赵庆海，李江波，2016. 2013 年 7 月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J]. 气象，42(5)：578-588.

雷蕾，何娜，孙继松，等，2017. "7・20"华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J]. 气象学报，75(5)：685-699.

李修芳，1997. 影响华北地区的黄河气旋过程分析[J]. 气象，23(1)：17-22.

李云，缪启龙，江吉喜，2007. 2005 年 8 月 16 日天津大暴雨成因分析[J]. 气象，33(5)：83-88.

梁丰，陶诗言，张小玲，2006. 华北地区一次黄河气旋发生发展时所引起的暴雨诊断分析[J]. 应用气象学报，17(3)：257-265.

刘鸿波，何明洋，王斌，等，2014. 低空急流的研究进展与展望[J]. 气象学报，72(2)：191-206.

卢乃锰，吴蓉璋，1997. 强对流降水云团的云图特征分析[J]. 应用气象学报，8(3)：269-275.

覃丹宇，方宗义，2014. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展[J]. 气象，40(1)：7-17.

苏爱芳，张宁，黄勇，2016. "8・13"黄淮北部暴雨云团的组织结构和触发机制[J]. 气象，42(8)：905-919.

孙继松，雷蕾，于波，等，2015. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报，73(4)：609-623.

孙建华，齐琳琳，赵思雄，2006. "9608"号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. 气象学报，64(1)：57-71.

孙建华，张小玲，卫捷，等，2005. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J]. 气候与环境研究，10(3)：492-506.

孙建华，赵思雄，傅慎明，等，2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学，37(3)：705-718.

孙淑清，翟国庆，1980. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学，4(4)：327-337.

陶诗言，1980. 中国之暴雨[M]. 北京：科学出版社.

王瑾，蒋建莹，江吉喜，2009. "7・18"济南突发性大暴雨特征[J]. 应用气象学报，20(3)：295-303.

杨贵名，毛冬艳，姚秀萍，2006. "强降水和黄海气旋"中的干侵入分析[J]. 高原气象，25(1)：16-28.

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)：61-70，138.

易笑园，张义军，王红艳，等，2013. 线状中尺度对流系统内多个强降水单体的结构演变及闪电活动特征[J]. 气象学报，71(6)：1035-1046.

喻谦花，郑士林，吴蓁，等，2016. 局部大暴雨形成的机理与中尺度分析[J]. 气象，42(6)：686-695.