

王宏,王丛梅,高峰,等,2017.承德市两次局地性短时暴雨过程的中尺度特征对比分析[J].气象,43(12):1507-1516.

承德市两次局地性短时暴雨过程的中尺度特征对比分析*

王 宏¹ 王丛梅² 高 峰³ 高艳春¹ 王万筠⁴ 胡赛安¹ 吴显春¹

1 河北省承德市气象局,承德 067000

2 河北省邢台市气象局,邢台 054000

3 河北省承德市文物局,承德 067000

4 天津市滨海新区气象局,天津 300457

提 要: 2014 年 6 月 17 日和 7 月 15 日,同样在冷涡系统影响下,河北省承德市区先后出现了两次局地性短时暴雨天气过程(小时雨强分别为 39.6 和 66.1 mm·h⁻¹,最大 10 min 雨强分别为 15 和 18 mm)。本文利用常规观测资料、5~10 min 加密自动站资料、多普勒雷达数据、卫星云图数据以及 NCEP 再分析资料,对这两次短时暴雨过程的中尺度特征进行对比分析。结果表明:分钟级降水观测显示,“6·17 暴雨”过程 10 min 雨量随时间表现为持续时间分别约为半小时的双峰型分布;“7·15 暴雨”过程降水呈单峰型,持续时间不足 1 h;两场局地暴雨是在高空冷涡环流背景下产生的,其触发系统均为地面中尺度辐合中心(辐合线),降水峰值与东南风或风速增大相关联,6 m·s⁻¹的东南风有利于强降水的维持。卫星资料显示,“6·17 暴雨”过程直接影响系统为 β 中尺度对流系统,强降水与 TBB 低值区对应,“7·15 暴雨”强降水对流系统则表现为 γ 中尺度,与 TBB 大梯度区对应。“6·17 暴雨”过程对应水平尺度近 20 km,生命史约半小时,回波强度达 65 dBz 对流单体回波的合并增强。“7·15 暴雨”过程则表现为多个水平尺度不足 5 km,生命史不到 1 h,回波强度达 55 dBz 的对流单体回波依次经过承德市区,因“列车效应”造成。两次降水过程中逆风区的出现时间都与强降水时段有很好的配合,且逆风区的持续时间越长,产生的降水强度也越大。

关键词: 局地性短时暴雨,中尺度特征,对比分析

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.12.006

Comparative Analysis on Mesoscale Characteristics of Two Local Short-Time Severe Rainstorm Processes in Chengde

WANG Hong¹ WANG Congmei² GAO Feng³ GAO Yanchun¹

WANG Wanjun⁴ HU Sai'an¹ WU Xianchun¹

1 Chengde Meteorological Office of Hebei, Chengde 067000

2 Xingtai Meteorological Office of Hebei, Xingtai 054000

3 The Relics Bureau of Chengde, Chengde 067000

4 Meteorological Office in Binhai New District of Tianjin, Tianjin 300457

Abstract: On 17 June and 15 July 2014, two continuous local short-time severe rainstorms occurred in Chengde as a result of cold vortex. The hourly rainfalls were 39.6 and 66.1 mm·h⁻¹ respectively and the maximum 10 min rainfalls were 15 and 18 mm correspondingly. Based on conventional observation data, 5–10 min automatic weather station data, Doppler radar data, satellite images and NCEP reanalysis data,

* 国家自然科学基金项目(41575049)和河北省气象局强对流创新团队共同资助

2016 年 8 月 15 日收稿; 2017 年 3 月 7 日收修定稿

第一作者:王宏,主要从事短期预报及强对流天气成因研究. Email: whlzqlgd@sina.com

the mesoscale characteristics of the two short-time severe rainstorms are analyzed in this paper. The minute precipitation observation reveals that in the 17 June rainstorm process, 10 min rainfall showed a double peak type distribution as time going on, lasting about half an hour. In the 15 July rainstorm process, it showed a single peak type, which lasted less than 1 h. Both of the two local heavy rains were generated with the upper cold vortex circulation, and their triggering system is the ground mesoscale convergence center (convergence line). The precipitation peak was associated with southeast wind or the increased wind speed. The $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ southeast winds were favorable for the heavy rains. Satellite data show that the direct influence system of the rainstorm on 17 June 2014 was the meso- β scale convective system. The heavy precipitation was corresponding to the low area of TBB. The severe convective system on 15 July 2014 performed as the meso- γ scale, corresponding to the large gradient area of TBB. The rainstorm on 17 June 2014 corresponded to the merge enhancement of convective cell echoes, which had a horizontal scale of near 20 km, lasting about half an hour with the echo intensity of 65 dBz. The rainstorm on 15 July 2014 was shown that a number of convective cell echoes passed through the urban area of Chengde in order, due to the “train effect”, and the convective cell echoes had a number of horizontal scales of less than 5 km, living less than 1 h with echo intensity 55 dBz. In two precipitation processes, the occurrence time of inverse wind area was corresponding to that of the short-time strong rainfall, the duration of inverse wind area was longer, and the rainfall intensity is also stronger.

Key words: local short-time rainstorm, mesoscale characteristics, comparative analysis

引 言

短时暴雨或短时强降水又称为对流暴雨,是由中小尺度系统或超级单体、飑线、中尺度对流系统 etc 对流风暴造成的。近年来,许多专家对强暴雨过程中尺度对流系统(MCS)进行了深入分析。矫梅燕等(2006)指出淮河流域大暴雨期间梅雨锋区等假相当位温线随高度近于垂直分布,具有类似热带系统的暖心结构特征;陈力强等(2005)指出东北冷涡诱发的 MCS 在成熟阶段地面出现强雷暴高压、弱前导低压和尾随低压等特征;何立富等(2006)分析表明, $M\beta$ CS 在对流层低层表现为中尺度辐合线或强辐合中心, 雷达回波和径向速度场所反映的中尺度回波带和辐合线,与 $M\beta$ CS 的演变有密切的关系。 $M\beta$ CS 在发展强盛期呈现相当正压性,而且垂直倾斜的上升气流及其两侧有明显的下沉补偿气流;喻谦花等(2016)指出,中尺度雨团与 $M\alpha$ CS 相伴,而 $M\alpha$ CS 是地面中尺度辐合线或辐合中心触发产生并发展的多个 $M\gamma$ CS 和 $M\beta$ CS 合并加强的结果。

短时暴雨由于其空间尺度小,突发性强,对流强度大等特点,对它的预报一直是个难点(何晗等, 2015)。随着各种非常规新型探测资料的应用,在短

时暴雨天气过程的中尺度特征分析和预报研究方面取得了很多进展。王啸华等(2012)指出,短时暴雨的中尺度特征在云图 TBB 资料上表现为对流云团合并后,范围和强度显著增强,移速减慢,TBB 梯度大值区的停留。地面风场上表现为南移的中尺度辐合线和局地生成的中尺度辐合中心合并加强。冯晋勤等(2014)分析总结了 2005—2009 年福建西部山区短时暴雨的雷达回波和中小尺度系统特征。郭虎等(2008)对暴雨的中小尺度特征分析指出,近地面辐合对大暴雨落区和强降雨的发生具有重要作用。王丽荣等(2011)发现,局地短时强降水和 γ 中尺度系统关系密切,风场反演揭示的 γ 中尺度涡旋和风场辐合等小尺度系统,对短时强降水的落区及生消预报有较大的作用。何斌等(2015)探讨了中尺度天气系统活动特征与强降雨的关系。

承德地处河北省北部山区,夏季短时暴雨过程频发,降水强度大,分布不均匀,局地性较强,短时暴雨的中尺度特征明显。例如,2014 年 6 月 17 日和 7 月 15 日,在不足一个月的时间里,承德市城区连续出现局地短时暴雨天气过程,城市积涝严重,多处护坝坍塌。由于强降水出现在下班晚高峰期,给城市交通和市民正常工作及生活带来非常大的影响。本文使用常规观测资料、自动站加密观测资料、FY-2E

(2F) 红外卫星云图数据、承德雷达观测数据及 NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 6 h 再分析数据,对这两次短时暴雨过程的中尺度特征进行对比分析,尝试为综合探测资料在夏季短时暴雨预警预报中的应用提供着眼点,为城市短时临近强降水预报拓宽思路。

1 降水实况

2014 年 6 月 17 日和 7 月 15 日,在冷涡系统影响下,河北省承德市城区连续发生两次局地性短时暴雨天气过程,过程最大雨量分别为 69.8 和 70.1 mm (图 1a、1b),并伴随短时暴雨、雷雨大风和冰雹。降水分布极为不均,强降水只出现在承德市城区,小时雨强分别为 39.6 和 $66.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。承德市城区自动站(承德、石洞子沟)10 min 雨量观测显示(图 1c、1d),降水集中出现在两小时内,最大 10 min 雨强分别为 15、18 mm。第一次降水过程(简称“6·17 暴雨”)出现在 6 月 17 日的 17:02—19:04,强降水主要集中在 17:15—17:45 和 18:07—18:50,呈双峰型,两个峰值持续时间大约为 0.5 h。

第二次降水过程(简称“7·15 暴雨”)出现在 7 月 15 日的 16:45—18:16,强降水主要集中在 17:22—18:14,持续时间不足 1 h,呈单峰型。

2 天气背景与局地对流环境条件分析

2.1 天气背景

6 月 17 日 08 时,500 hPa 图上(图 2a),贝加尔湖附近的冷涡中心位于 51°N 、 105°E ,其底部的低槽位于内蒙古中部到山西一带,承德位于冷涡的南偏东象限,受槽前的西南气流控制。700 hPa 图上,低涡在蒙古东部,与之配合的切变线位于 500 hPa 槽线以西。在 850 hPa 图上,低涡也位于该位置,而在河北省西部到河套地区为一气旋性环流中心控制,河北省的西北部到内蒙古东部一带有一条东北—西南向切变线,850 hPa 的暖脊自河套东部向东北地区伸展。700 hPa 以下承德周边温度露点差在 4°C 以下,低层湿度条件好。7 月 15 日 08 时 500 hPa 图上(图 2b),欧亚大陆中高纬地区为经向环流形势,

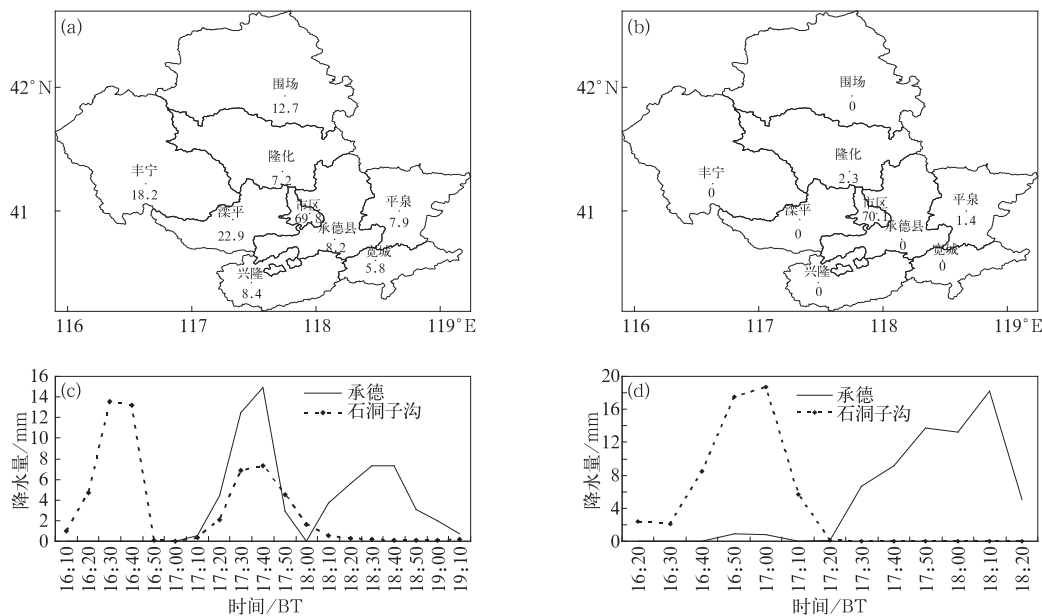


图 1 2014 年 6 月 17 日 08 时至 18 日 08 时(a)、7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时(b)国家站
累积降水量(单位:mm),6 月 17 日 16:10—19:10(c)、7 月 15 日 16:20—18:20(d)
承德城区自动站 10 min 雨量变化曲线(单位:mm)

Fig. 1 The 24 h accumulated rainfall (unit; mm) from 08:00 BT 17 to 08:00 BT 18 June (a) and from 08:00 BT 15 to 08:00 BT 16 July (b) 2014, variation curves of 10 min rainfall at automatic stations in Chengde (unit; mm) during 16:10—19:10 BT 17 June (c) and 16:20—18:20 BT 15 July (d) 2014

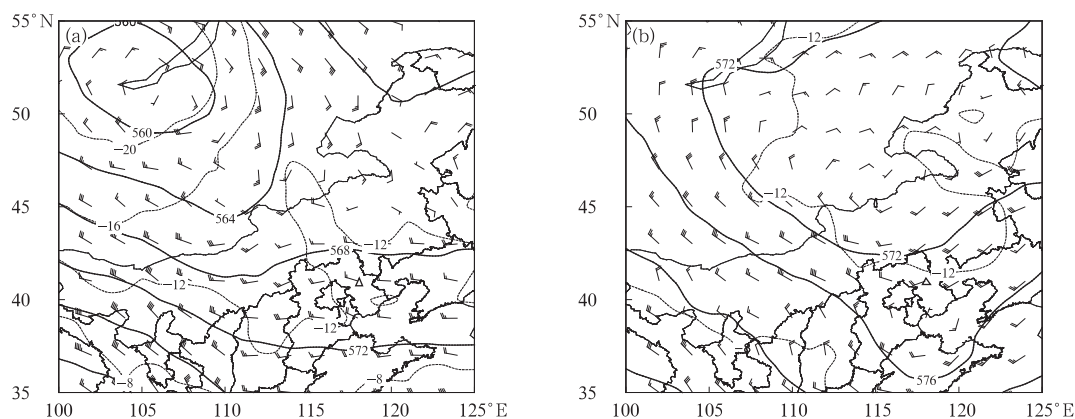


图 2 2014 年 6 月 17 日 08 时(a)和 7 月 15 日 08 时(b)500 hPa 位势高度场(实线, 单位: dagpm)、温度场(虚线, 单位: °C)和风场
(图中△代表承德城区位置)

Fig. 2 The 500 hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm), temperature (dashed line, unit: °C) and wind field at 08:00 BT 17 June (a), and 08:00 BT 15 July (b) 2014
(△ represents the location of Chengde)

蒙古东部有一冷涡存在,承德位于冷涡的南偏西象限,受西—西北气流影响,低层湿度条件不如“6·17暴雨”过程好。500 hPa 高空槽位于河北中东部,冷涡后部的西北气流有利于引导冷空气东移南下及河北中东部高空槽的加深。同时 850 hPa 的切变线位于内蒙古中东部。从高低层的配置看,系统呈现明显的前倾结构。

综合来看,这两次短时暴雨天气过程都是在欧亚范围环流经向度比较大,有高空冷涡配合的环流背景下产生的,但是冷涡的位置、强度和长轴走向有明显不同。“6·17暴雨”500 hPa 冷涡中心位于 51°N、105°E,冷涡中心强度较强,最低值为 560 dagpm,长轴为西北—东南走向。中、低层均出现闭合中心,冷涡深厚,致使系统移动较慢,降水持续时间较长。“7·15暴雨”发生时,冷涡中心位于 46°N、115°E,冷涡中心最低值为 569 dagpm,长轴为东北—西南走向,冷涡中心强度弱于“6·17暴雨”过程。850 hPa 低涡不明显,系统浅薄,移动较快,降水持续时间相对较短。

2.2 局地对流环境条件分析

Johnson and Bresch(1991)利用中午的地面观测资料对早上的探空进行修正,以获取雷暴发生前的热力环境,对于雷暴中尺度系统分析相当有效。本文结合 2014 年 6 月 17 日 14 时和 7 月 15 日 08 时北京的探空曲线,利用承德 14 时的地面实况构造

承德探空曲线。从订正后的 14 时探空曲线(图 3)可以看出,“6·17暴雨”和“7·15暴雨”过程均为“上干下湿”结构,中层(600~400 hPa)都存在干层,这种形势配置有利于强对流天气的产生。不同点在于,“6·17暴雨”过程,低层 925~700 hPa 的温度露点差较小,水汽比较丰富。而“7·15暴雨”过程,850 hPa 以下温度露点差较大,水汽含量低。且“7·15暴雨”过程的地面温度高于“6·17暴雨”过程,热力不稳定更明显,地面附近热对流发生发展的条件相当优越。因此从热力条件分析,7 月 15 日午后承德地区的对流潜势明显增强,对流发展的条件进一步优化。

强对流的发生需要大气不稳定、水汽和抬升三个基本条件。表 1 给出了“6·17暴雨”和“7·15暴雨”过程开始前承德站 14 时的关键环境参数。

从表 1 中可以看出,在两次过程开始前的 14 时,表示层结稳定度的三个参数(K 、 T_{85} 、 $MDCI$)中,承德的 K 指数 >35 °C,修正的深对流指数($MDCI$) >175 K, T_{85} (850 与 500 hPa 之间的温差) >28 °C; 表示温、湿的三个参数中(PW 、 Q_{850} 、 θ_{se700}), PW 在两次过程中均为高值,特别是“6·17暴雨”过程达到近 65 mm, Q_{850} 都大于 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, θ_{se700} 明显大于 356 K; 表示大气特性层高度的参数(PC 、 Z_0 、 Z_{-20}), 抬升凝结高度 PC 都在 600 hPa 附近, 0°C 层高度 Z_0 在 4000 gpm 上下, -20°C 层高度在 7000 gpm 左右; 从表示动力参数的 0~6 km 垂直风切变可看出,

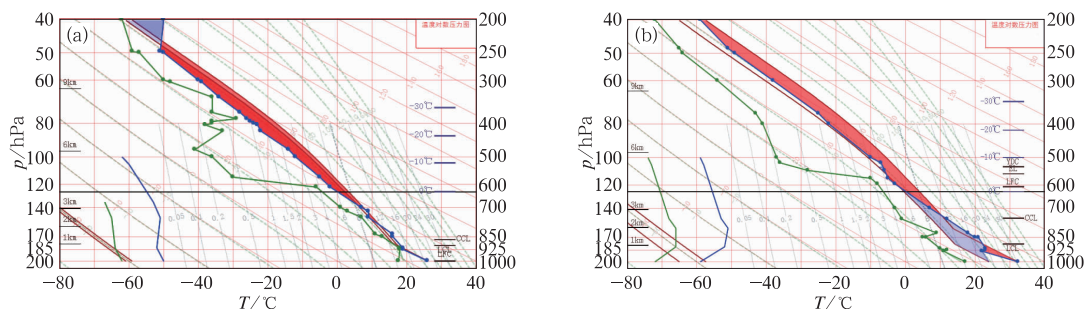


图 3 根据 2014 年 6 月 17 日 14 时(a)和 7 月 15 日 14 时(b)地面实况构造的承德探空曲线

Fig. 3 Skew T - $\log p$ diagram of Chengde according to the surface observation at 14:00 BT 17 June (a) and 14:00 BT 15 July(b) 2014

表 1 两次短时暴雨的一些关键环境参数统计

Table 1 Key environmental parameters of two short-time rainstorms

	K 指数 / $^{\circ}\text{C}$	$MDCI$ / K	TT / $^{\circ}\text{C}$	PW / mm	PC / hPa	Z_0 / gpm	Z_{-20} / gpm	$SWEAT$	Q_{850} / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	θ_{se700} / K	T_{85} / $^{\circ}\text{C}$	0~6 km 切变 / 10^{-3} s^{-1}
2014-6-17	35.9	179.5	52.0	64.9	609.4	3870.7	6914.4	218.0	12.8	376.1	28.1	6.72
2014-7-15	40.1	180.4	46.9	59.1	613.7	4053.0	7128.5	132.2	8.3	399.5	29.7	12.4

两次过程均处于弱到中等垂直风切变环境中(俞小鼎等, 2012);从表示热力和动力的参数(TT 、 $SWEAT$)可以看出,全总指数 $TT > 45^{\circ}\text{C}$,但强天气威胁指数($SWEAT$)没达到产生强雷暴的标准(Doswell et al, 1996)。

以上分析表明,2014 年 6 月 17 日和 7 月 15 日两天承德站均具备强对流发生的环境条件。 K 指数 $> 35^{\circ}\text{C}$, $T_{85} > 28^{\circ}\text{C}$, $PW > 59 \text{ mm}$,全总指数 $TT > 45^{\circ}\text{C}$ 。不同点在于“7·15 暴雨”过程的垂直风切变强于“6·17 暴雨”过程,这更有利于高度组织化对流系统形成,促使风暴发展得更强盛。

3 中尺度特征

3.1 地面中尺度系统

从加密自动站逐 5 min 风场资料分析看,6 月 17 日 14 时,丰宁和围场的西北部形成了一条近东北—西南向的中尺度辐合线,辐合线的左侧是东北风,右侧是偏南风。15:10,在承德市区有一中尺度辐合中心形成,偏南风风速大于偏北风。1 h 后即 16:10 石洞子沟站的降水开始,雨强不强,10 min 雨量仅为 1 mm。16:20 以后东南风风速加大,降水开始加大,到 16:40,20 min 降水量达 26.8 mm。16:55,北部的中尺度辐合线移动到隆化和丰宁两县的东南部及滦平、市区、承德县三个地区的北部,辐合线两侧的风速加强,说明中尺度对流系统在发展加

强。17:05—17:20,承德站一直维持 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北或偏北风。17:25(图 4a),承德站的风向转为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏东风,降水开始加大。从 17:20—17:40,承德站的降水量达 27.4 mm,期间承德站一直为 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风。对应压、温、湿、风气象要素演变(图 4c),降水开始前,承德站一直维持着 $2 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风,温度、相对湿度变化不明显。从 14:40 以后,气温逐渐下降,说明有扩散冷空气入侵,在其触发下承德站于 16:48 产生降水。在 17:10 强降水开始的时刻,相对湿度明显增加,风速逐渐增大,气压逐步升高,温度快速下降,表明主体冷空气影响承德站。随着主体降水的到来,17:30,地面气压在 20 min 内上升了 1.5 hPa,同时地面的相对湿度也明显增大,温度迅速下降。强降水开始后 10~20 min,风向由北风突变为南风,风速陡然增大到 $9.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。17:50 风速减小到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,降水也随之减小。18 时承德地区北部的辐合线移动到市区,承德站的风向由偏东风转为偏北风,降水再次加强,随着西北风的增大,雨强亦增大。18:20—18:40,承德站为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西北风,此时降水量达 14.6 mm。以后西北风逐渐减小,雨强亦减小,19 时以后辐合线移出市区,降水结束。

7 月 15 日 15:20,在围场的东南部到隆化的北部有一条东北—西南向辐合线,15:35,在承德市区出现中尺度辐合中心,16:20,石洞子沟站的降水开始。此后该辐合中心稳定少动,16:40—17:00,石洞子沟站的降水量达 36.2 mm。16:42 承德站出现降

水,17:05—17:15 一直为 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风控制,降水强度较弱。从 17:20—18:05(图 4b),位于承德市区的辐合中心稳定少动。17:20,承德站的东南风加大到 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,承德站开始出现强降水。17:40—18:10,承德站一直为 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风,半小时雨量达 45.1 mm。从压、温、湿、风气象要素演变看出(图 4d),降水开始前,承德站的温度和气压逐渐下降、相对湿度逐渐增大。16:40 以后,相对湿度迅速增加,气温快速下降,此时开始出现降水。在 17:20 强降水开始以后,气压上升,风向由南东南风突变为东南东风。强降水开始后的 20~

40 min,风向又由东南东风突变为南风,风速陡然增大到 $12.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。强降水期间,地面气压上升了 1.5 hPa。18:18 后,承德市区的中尺度辐合中心逐渐减弱,降水停止。对比图 4c 和 4d 发现,两个图的温度、露点纵坐标范围不同,说明“7·15 暴雨”过程的温、湿特征显著高于“6·17 暴雨”过程,因此“7·15 暴雨”过程雨强比“6·17 暴雨”过程大。

通过以上分析可以看出,“6·17 暴雨”降雨强度两次加强分别由地面中尺度辐合中心和中尺度辐合线触发,中尺度辐合中心引起的雨强强于辐合线引起的雨强。“7·15 暴雨”是由地面中尺度辐合中

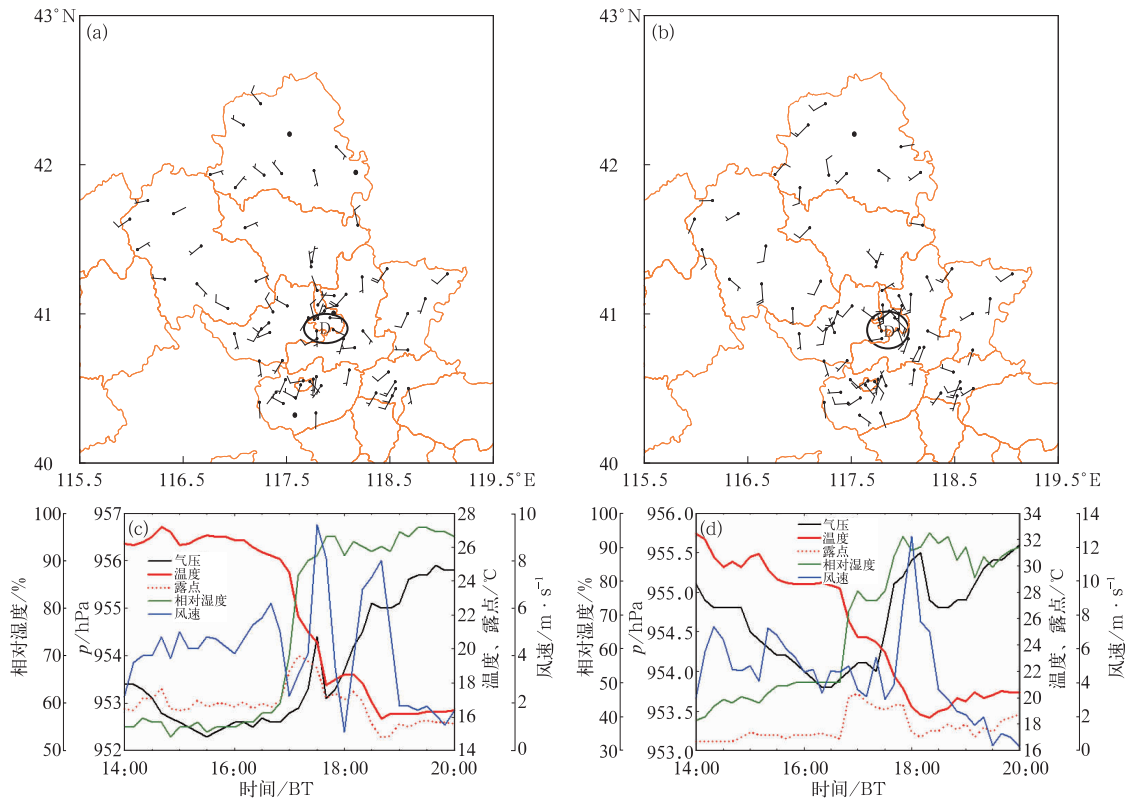


图 4 2014 年 6 月 17 日 17:25(a)和 7 月 15 日 18:05(b)承德地面风场,
14:00—20:00 气压、气温、露点、相对湿度及风速演变(c,d)

(图 4a,4b 中椭圆圈代表中尺度辐合系统,D 表示中尺度风场辐合中心)

Fig. 4 The wind field at 17:25 BT 17 June (a) and 18:05 BT 15 July (b) 2014 from automatic weather stations and evolution of air pressure, temperature, dewpoint, humidity, wind speed at Chengde from 14:00 to 20:00 BT 17 June (c) and on 15 July (d) 2014

(Elliptic circle means mesoscale convergence system, D indicates the convergence center of mesoscale wind field in Figs. 4a and 4b)

心触发的。“6·17 暴雨”呈现双峰变化,“7·15 暴雨”呈现单峰变化。

3.2 中尺度对流云团分析

从大范围的卫星云图可以看到,6 月 17 日

11:30,在河北省的西部及内蒙古的中东部,500 hPa 低涡前部有多个水平尺度不足 50 km 的 β 中尺度对流云团发展,云顶 TBB 在 -50°C 以下。随着冷涡的东移南下,云团的尺度逐渐增大。13:30,多个 β 中尺度对流云团合并成东北—西南向云带,进入承德

西北部的坝上地区,此时该处有降水产生。云带北部即距离 500 hPa 低涡较近处的云团发展强烈,云顶 TBB 不断降低,其云顶 TBB 低于云带南部的 TBB,水平尺度不断增大。16:00,云带北部的云团移到承德市的围场和隆化一带,云顶 TBB 中心强度低于 -52°C ,水平尺度达 150 km,并逐渐向南移动。17:00(图 5a),该 β 中尺度对流云团进入承德市区境内,承德站开始产生降水。17:30(图 5b)至 18:30(图 5c),承德上空该云团的 TBB 中心强度一直低于 -52°C ,在此期间承德站出现了 1 h 达 39.6 mm 的强降水,造成市区的短时暴雨天气。19:30 以后,承德上空云团的 TBB 值逐渐增加,并向东南方向移动,表明云团内对流活动已经逐渐减弱,降水逐渐停止。

7 月 15 日 14:30,在河北省周边有多个水平尺度在 20 km 以下的 γ 中尺度对流云团发展,其中承德围场的东部有一个云顶 TBB 低于 -32°C ,水平尺度在 15 km 左右的云团,随后该云团缓慢移动不断影响围场,致使围场出现分散性的雷阵雨天气。17:00(图 5d),该云团向东南方向移动到内蒙古的喀喇沁旗,承德受其外围云顶 TBB 值较高的云系影响,产生弱降水天气。17:30(图 5e),在该云团的西

南部又触发一个水平尺度为 10 km 的 γ 中尺度的对流云团,云顶 TBB 在 -32°C 以下,承德市区的降水开始加大。17:30—18:30(图 5f),这两个云团合并,范围不断扩大至水平尺度近 20 km,强度增强,云顶 TBB 在 -42°C 以下,承德市区位于云顶 TBB 的大梯度区偏向低值一侧,此时降水强度达 $66.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,造成承德市的局地暴雨天气。19:00,该云团东移出承德市区,降水减弱。

综合这两次降水过程来看,两次过程都是由维持时间在 1~2 h 的中尺度对流云团影响的,“6·17 暴雨”强降水时段与云顶 TBB 的低值区对应,“7·15 暴雨”强降水时段和云顶 TBB 梯度的大值区相配合。

3.3 雷达回波分析

6 月 17 日 14:00, 3.4° 仰角图上,在承德雷达的西北部 100 km 距离圈之外为片状回波覆盖,该片状回波随地面辐合线自西北向东南方向移动。片状回波前沿,丰宁和围场两县西北部的地面辐合线上有多个小块对流单体回波。16:00(图 6a₁),承德市区西部 20 km 处,有最强中心强度为 45 dBz,尺度在 10 km 以下的单体 1 发展,对应的平均径向速度

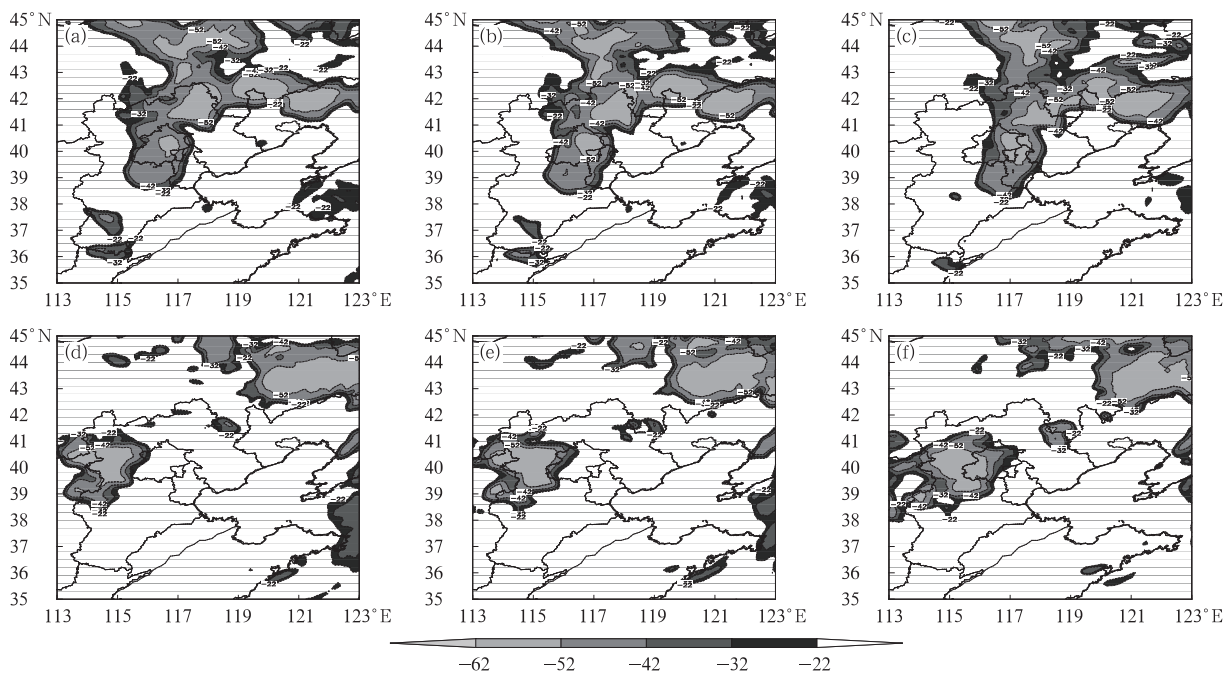


图 5 2014 年 6 月 17 日(a, b, c)、7 月 15 日(d, e, f)17:00(a, d),17:30(b, e)和 18:30(c, f)FY-2E(2F)卫星 TBB(单位: $^{\circ}\text{C}$)的分布

Fig. 5 Distribution of TBB (unit: $^{\circ}\text{C}$) from FY-2E (FY-2F) satellite on 17 June (a, b, c) and 15 July (d, e, f) 2014 (a, d) 17:00 BT, (b, e) 17:30 BT, (c, f) 18:30 BT

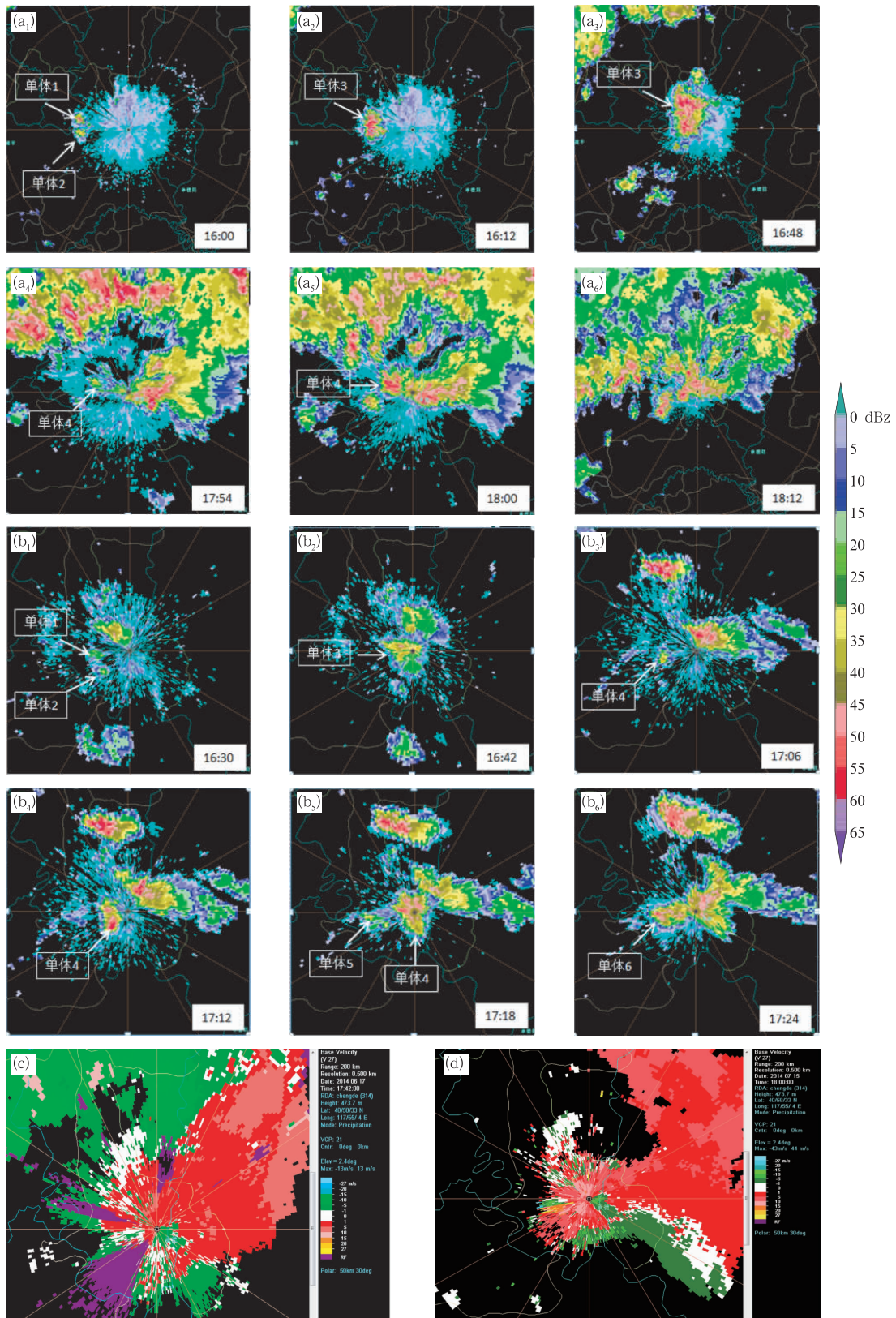


图 6 2014 年 6 月 17 日 (a₁~a₆, c) 和 7 月 15 日 (b₁~b₆, d) 承德雷达 3.4° 仰角基本反射率 (a₁~a₆, b₁~b₆) 和 2.4° 仰角平均径向速度 (c, d)

Fig. 6 The base reflectivity at 3.4° elevation (a₁~a₆, b₁~b₆) and the mean meridional velocity at 2.4° elevation (c, d) in Chengde on 17 June (a₁~a₆, c) and 15 July (b₁~b₆, d) 2014

图上存在速度辐合。在该回波的右后方,即辐合线的后部还有一尺度在 8 km 以下单体 2 发展,回波强度为 25 dBz。回波主体右侧新生的回波,往往会强烈发展和增强(李云川等,2006),标志着未来在此块小块对流回波附近要新生成风暴。16:06,单体 1 迅速发展增强,回波中心强度达到 60 dBz,其右后侧的单体 2 也迅速增强到 50 dBz。16:12(图 6a₂),单体 1 和单体 2 沿着风暴承载层平均风向向东北偏东方向移动中合并增强为单体 3,强中心达到 65 dBz,此时石洞子沟站的强降水开始。16:48(图 6a₃),单体 3 移近雷达站,承德站开始产生降水。随着时间的推移,强回波的位置和强度变化不大。17:10—17:48,单体 3 造成承德站第一轮强降水,降水量为 34.1 mm。从图 6c 可以看出,17:36—17:42 承德站出现逆风区。张沛源和陈荣林(1995)认为,在逆风区附近及其移动路径上将出现和正出现暴雨。这一逆风区持续时间不长,在实况上则表现为在 17:20—17:40 出现 20 min 27.4 mm 降水以后,降水强度有很大的减弱。17:48 以后,单体 3 移出承德站,降水间歇。17:54(图 6a₄),片状回波前沿的多个对流强单体回波连成线状,在其前方 10 km 范围内又有多个对流单体生成,其中单体 4 发展迅速。到 18:00(图 6a₅),单体 4 的最强中心达到了 55 dBz,再次影响承德市区。18:12(图 6a₆)以后,市区附近的多个对流单体回波与移向市区的地面辐合线上的线状强回波合并,降水加大,承德站出现第二轮强降水。19:06 地面辐合线移出市区,回波强度减弱,降水逐渐减小。

7 月 15 日,3.4°仰角图上,14 时以前承德辖区有分散的对流回波。16:18,承德的上游出现尺度在 5 km 以下,强度为 40 dBz 的回波,对应平均径向速度图上有辐合线存在。16:30(图 6b₁),在辐合线附近,承德雷达站的西部 6.0 km 处有两个尺度在 5 km 以下单体 1 和单体 2 生成,强度不强,强中心只有 30 dBz。16:42(图 6b₂),单体 1 和单体 2 合并为单体 3,强度增强,强中心达 45 dBz,沿着风暴承载层平均风向向东北偏东方向移动,承德站产生弱降水。16:42—17:00,单体 3 稳定少动,石洞子 10 min 最大降水量达 18.7 mm。17:06(图 6b₃),承德雷达站的西部 6.0 km 处,辐合线附近再次有强度为 40 dBz,尺度在 5 km 以下单体 4 生成。从 17:12(图 6b₄),单体 4 迅速发展,范围加大,强度增强,最强中心达 55 dBz。17:18(图 6b₅),在承德雷

达站的西部辐合线附近第三次出现尺度在 5 km 以下,强度为 30 dBz 的单体 5。17:24(图 6b₆),单体 5 增强东移,并与影响市区的单体 4 合并为单体 6,此时承德市再次开始出现强降水。17:36,强度大于 55 dBz 的单体 6 范围扩大。此后,单体 6 一直维持在承德上空。从平均径向速度图上(图 6d)可看出,从 17:36—18:12,承德站一直存在逆风区,其位置与反射率图上的强度中心配合较好,降水强度增强,造成承德市区出现 66.1 mm·h⁻¹ 的局地暴雨天气。出现如此强的降水主要原因是自 16:42—17:18,在承德市区的上游 6 km 处,辐合线附近,不断有强度大于 30 dBz 对流单体新生,生成后在向下风方向移动过程中合并增强,强度达 55 dBz 以上。这些回波不断从承德市区经过,形成“列车效应”(俞小鼎等,2012;Doswell et al,1996)。形成列车效应的主要原因是地面中尺度辐合中心形成的上升气流触发对流。18:18 强回波移出市区,降水减弱。

上述分析表明,“6·17 暴雨”的强降水阶段与单体合并增强以及与市区附近的多个对流单体回波和移向市区的线状强回波合并加强有关,“7·15 暴雨”是由上游辐合线附近不断新生的对流单体在向下风方向移动过程中合并增强,依次经过承德市区而产生的。两次降水过程的强降水时段均出现了逆风区,“6·17 暴雨”过程逆风区持续时间短,而“7·15 暴雨”过程逆风区持续时间较长,达 0.5 h 以上,因此该次过程的雨强强于“6·17 暴雨”过程的雨强。

4 结 论

本文使用常规观测资料、自动站观测资料、雷达观测数据、TBB 资料和 NCEP 再分析数据,对 2014 年夏季发生在承德市区的两次局地性短时暴雨过程的中尺度特征进行对比分析,得出以下结论。

(1) 承德两次短时暴雨过程都是在高空冷涡环流背景下产生的。这两场局地暴雨都有明显的中尺度活动特征,历时短、强度大,最强降水出现在承德市区是其共同特点。“6·17 暴雨”过程降水随时间分布呈双峰型,“7·15 暴雨”过程降水为单峰型。

(2) “6·17 暴雨”过程,700 hPa 以下水汽含量较为丰富。“7·15 暴雨”过程地面温度较高,热力不稳定明显,垂直风切变较强,较好的动力、热力条件表明承德局地具有较明显的对流潜势,致使该过

程雨强大于“6·17暴雨”过程。

(3) 承德两次短时暴雨在强降水出现的过程中,地面自动站风场上存在中尺度风场辐合中心和尺度切变线。辐合中心影响时风向由偏北风转为偏东风时降水开始增强,降水峰值与东南风或风速增大相关联, $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风有利于强降水的维持。辐合线过境时,风向由偏东转为偏北,随着西北风逐渐增大,降水强度增强。

(4) “6·17暴雨”是由 β 中尺度对流云团产生,强降水时段与TBB的低值区对应;影响“7·15暴雨”的对流云团的尺度相对较小,为 γ 中尺度,强降水时段对应TBB的大梯度区。

(5) 通过雷达回波分析(配合地面风场)可知,“6·17暴雨”是在中尺度辐合中心(辐合线)不断触发下,多个水平尺度近20 km,生命史约0.5 h,回波强度达65 dBz对流单体回波的合并增强引起。“7·15暴雨”是由中小尺度辐合线(辐合中心)附近不断新生的,水平尺度不足5 km,生命史不到1 h,回波强度达55 dBz的对流单体在向下风方向移动过程中合并增强,依次经过承德市区因列车效应而产生的。两次降水过程中的强降水阶段均出现了逆风区,逆风区的形成有利于暴雨产生垂直环流。“7·15暴雨”过程逆风区的持续时间较长,产生的降水强度强于“6·17暴雨”过程的雨强。

参考文献

陈力强,陈受钧,周小珊,等,2005.东北冷涡诱发的一次MCS结构

特征数值模拟[J].气象学报,63(2):173-183.

冯晋勤,汤达章,曹长尧,2014.福建西部山区短时暴雨雷达回波特征及中小尺度系统分析[J].气象,40(3):297-304.

郭虎,段丽,杨波,等,2008.0679香山局地大暴雨的中小尺度天气分析[J].应用气象学报,19(3):265-275.

何斌,范晓红,盛文斌,等,2015.“2013·7·21”杭州湾北岸短时大暴雨的中尺度分析[J].气象,41(7):842-851.

何晗,湛芸,肖天贵,等,2015.冷涡背景下短时强降水的统计分析[J].气象,41(12):1466-1476.

何立富,陈涛,李泽椿,2006.2004年北京“7·10”暴雨中 β 尺度对流系统分析[J].气象与减灾研究,29(1):7-16.

矫梅燕,毕宝贵,鲍媛媛,等,2006.2003年7月3—4日淮河流域大暴雨结构和维持机制分析[J].大气科学,30(3):475-490.

李云川,王福侠,裴宇杰,等,2006.用CINRAD-SA雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J].气象,32(10):64-69.

王丽荣,刘黎平,王立荣,等,2011.一次局地短时大暴雨中 γ 尺度分析[J].高原气象,30(1):217-225.

王啸华,吴海英,唐红昇,等,2012.2009年7月7日南京短时暴雨的中尺度特征分析[J].气象,38(9):1060-1069.

喻谦花,郑士林,吴葵,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.

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.

张沛源,陈荣林,1995.多普勒速度图上的暴雨判据研究[J].应用气象学报,6(3):373-378.

Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.

Johnson R H, Bresch J F, 1991. Diagnosed characteristics of precipitation systems over Taiwan during the May - June 1987 TAMEX[J]. Mon Wea Rev, 119(11):2540-2557.