

Causes Analysis on a Strong Convective Weather in Yanqing July 2017

Yanna Wang, Jie Zhang*, Jingyi Sui, Hongliang Yan, Jingchao Yang, Yaozhu Zhang

Yanqing District Meteorological Service of Beijing, Beijing
Email: wynicy@163.com, *1334329659@qq.com

Received: Dec. 29th, 2019; accepted: Jan. 12th, 2020; published: Jan. 19th, 2020

Abstract

By using the ERA5 reanalysis data and intensive ground observation data, the wind profile and Doppler radar data, and the satellite cloud data, a strong convective weather process in Yanqing on 7th July 2017 has been analyzed, and the challenges of the forecast and early warning service at primary station were also discussed. The results showed that: 1) the severe convective weather process occurred at a favorable synoptic-scale background, with a cold vortex in 500hPa, a convergence line and jet stream in 850 hPa, and a frontal cyclone on the ground surface. 2) In the afternoon, the convective instability developed significantly, with the convective available potential energy (CAPE) increasing from 200 J/kg to 2000 J/kg. At the same time, a moderate-to-strong intensity of the vertical wind shear (16 - 22 m/s) existed at 0 - 3 km, and the height of 0°C and -20°C were highly suitable for hail development, all of which means the meso-scale environment was inclined to the developing of supercell storms. Furthermore, the ground mesoscale convergence line and dew point front was the trigger mechanism. 3) Radar echo displayed that the convective cells strengthened into the Supercell storms when they reached the northern basin area of Huailai, and the satellite cloud picture showed "V" shape feature which imply to the hailstorm clouds, and wind profile radar detected a strong southeasterly updraft in the lower level when the supercells reached the western part of Yanqing.

Keywords

Strong Convective Weather, Mesoscaleconvergence Line, The Supercell Storm

2017年7月延庆地区一次强对流天气成因分析

王燕娜, 张杰*, 隋婧怡, 阎宏亮, 杨静超, 张瑶珠

北京市延庆区气象局, 北京
Email: wynicy@163.com, *1334329659@qq.com

*通讯作者。

文章引用: 王燕娜, 张杰, 隋婧怡, 阎宏亮, 杨静超, 张瑶珠. 2017年7月延庆地区一次强对流天气成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(1): 40-52. DOI: 10.12677/ccrl.2020.91005

收稿日期：2019年12月29日；录用日期：2020年1月12日；发布日期：2020年1月19日

摘要

本文采用欧洲中心再分析资料(ERA5)与加密地面观测资料、风廓线雷达和多普勒雷达以及云图资料,分析了2017年7月7日延庆地区一次强对流天气过程,并由此讨论了基层预报预警服务工作的难点。结果表明:1)此次强对流天气出现前大尺度环境条件有利于对流天气发展,高空受到低涡底部冷空气影响,低层存在切变线和西南急流,地面上受到气旋影响。2)午后对流不稳定性进一步加强,CAPE达到2000 J/kg,同时0~3 km存在中等到强的垂直风速切变(16~22 m/s),0℃和-20℃高度适宜冰雹发展,中小尺度环境场有利于对流单体发展为超级单体风暴;此外,地面上中尺度辐合线和露点锋是此次强对流发展的重要触发机制。3)雷达回波结构分析表明,对流单体南下到怀来北部盆地时加强发展为超级单体风暴,卫星云图表现出“V”形风雹云的特征,风廓线雷达监测表明超级单体开始影响延庆西部时,延庆城区低层出现强的东南风上升气流。

关键词

强对流天气, 中尺度辐合线, 超级单体风暴

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气中深厚湿对流的发生需要垂直层结不稳定(静力不稳定)、水汽和抬升触发3个条件。同时,大气中风向风速随高度的变化(垂直风切变)以及云和降水的微物理过程对大气中深厚湿对流的形成、结构和演变都有重要影响。研究表明[1]两条边界层辐合线发生碰撞,在碰撞交叉处更易形成强对流天气。许爱华[2]等对中国强对流个例的环境场进行了分析,归纳出强对流天气的环境参数特征。相对大的垂直累积液态水量[3][4]和三体散射[5][6]的出现也是强冰雹预警的重要辅助判据。朱君鉴[7][8]等分析了新一代天气雷达的冰雹指数(HI)、垂直积分液态含水量(VIL)、中气旋(M)等产品和多普勒特征对冰雹有较好的识别和预报能力。

延庆位于北京上游,从西北方向进入北京的天气系统会首先影响延庆地区,由于受地形作用影响,延庆地区局地气候与北京市其他区相比具有独特性,强对流天气是延庆主要灾害性天气之一,它时空尺度小、持续时间短、局地性强,常伴有冰雹、极端大风等灾害性天气,易造成较严重的损失。受2017年7月6日强降雨和7月7日风雹天气影响,延庆区4个乡镇房屋、农作物不同程度受损,其中,农作物受灾总面积18794.3亩,成灾面积7460.5亩,绝收面积909亩,农业损失1669.59万元。

延庆地区作为北京2022年冬奥会和冬残奥会比赛场地之一,将举办高山滑雪和雪车雪橇比赛,高山滑雪中心和雪车雪橇场馆均坐落于山区,汛期冬奥重大工程建设气象服务保障工作是重中之重。夏季延庆气温较城区明显偏低,有夏都之称,此时是延庆地区旅游旺季,郊游避暑的人群多,此外,北京世园会园区也位于延庆城区,气象条件对花卉植物生长以及游客游园体验也具有重要影响。因此,从延庆地区旅游服务角度和重大活动服务保障等方面综合考虑,延庆地区夏季强对流天气准确预报预警和服务至关重要,尤其对于确保冬奥会工程建设万无一失意义重大。

为此,选取2017年7月7日延庆发生的强对流天气进行深入分析,通过研究大气环流形势、探空结构、雷达和云图等变化特征,进一步加强认识强对流天气发展的中小尺度天气特征,并从预报预警服务的角度进行反思与总结,以期提升延庆区气象局业务人员在强对流天气短时临近预报中的着眼点和预警服务的经验。

2. 天气实况

2017年7月7日傍晚17时至22时,延庆地区出现强对流天气,伴有短时大风、冰雹和短时强降雨,雨量分布不均,最大降雨出现在延庆野鸭湖湿地,为32.6 mm (图1左)。天气系统过境时,东门营站瞬时极大风速达29.2 m/s (10级),康庄站达20 m/s (7级),延庆本站达12.4 m/s (6级) (图1右)。据全区气象自动站监测显示,91%的站点风力等级达到6级以上,58%的站点达到7级以上,30%的站点达到8级以上,18%的站点达到9级以上,15%的站点达到10级以上,6%的站点达到11级以上。

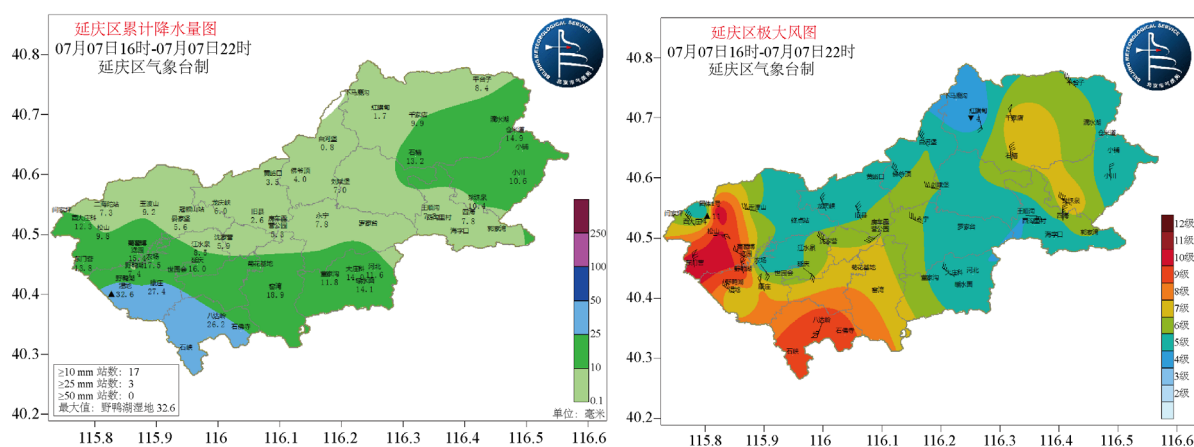


Figure 1. The distribution of precipitation (left) and the extreme wind speed (right) in Yanqing, 16 pm - 22 pm, 7th July 2017
图1. 延庆地区2017年7月7日16时至7月7日22时降水量(左)和极大风速(右)空间分布

3. 天气形势分析

3.1. 高空与地面形势

2017年7月7日08时500 hPa上北京地区受冷涡底部偏西气流控制(图2(a)),温度槽落后于高度槽,处于内蒙古中部,冷涡缓慢东移南压,20时,北京仍处于冷涡底部影响区(图2(b))。700 hPa低涡中心08时至20时稳定维持在内蒙古北部地区,北京受低涡底部西北气流影响(图2(c)和图2(d))。08时850 hPa切变位于内蒙古中北部地区(图2(e));20时850 hPa形成低涡,并有切变位于张家口与内蒙古交界处的上空,北京上空低空西南急流建立,风速显著增大到16 m/s (图2(f))。另外,可以看到20时850 hPa切变位于700 hPa系统后部,系统前倾,天气尺度系统为强对流中小尺度系统发展提供有利动力与水汽条件。此外,高层200百帕上08~20时北京处于西风急流气旋弯曲左侧,提供高层辐散(图2(g)和图2(h))。

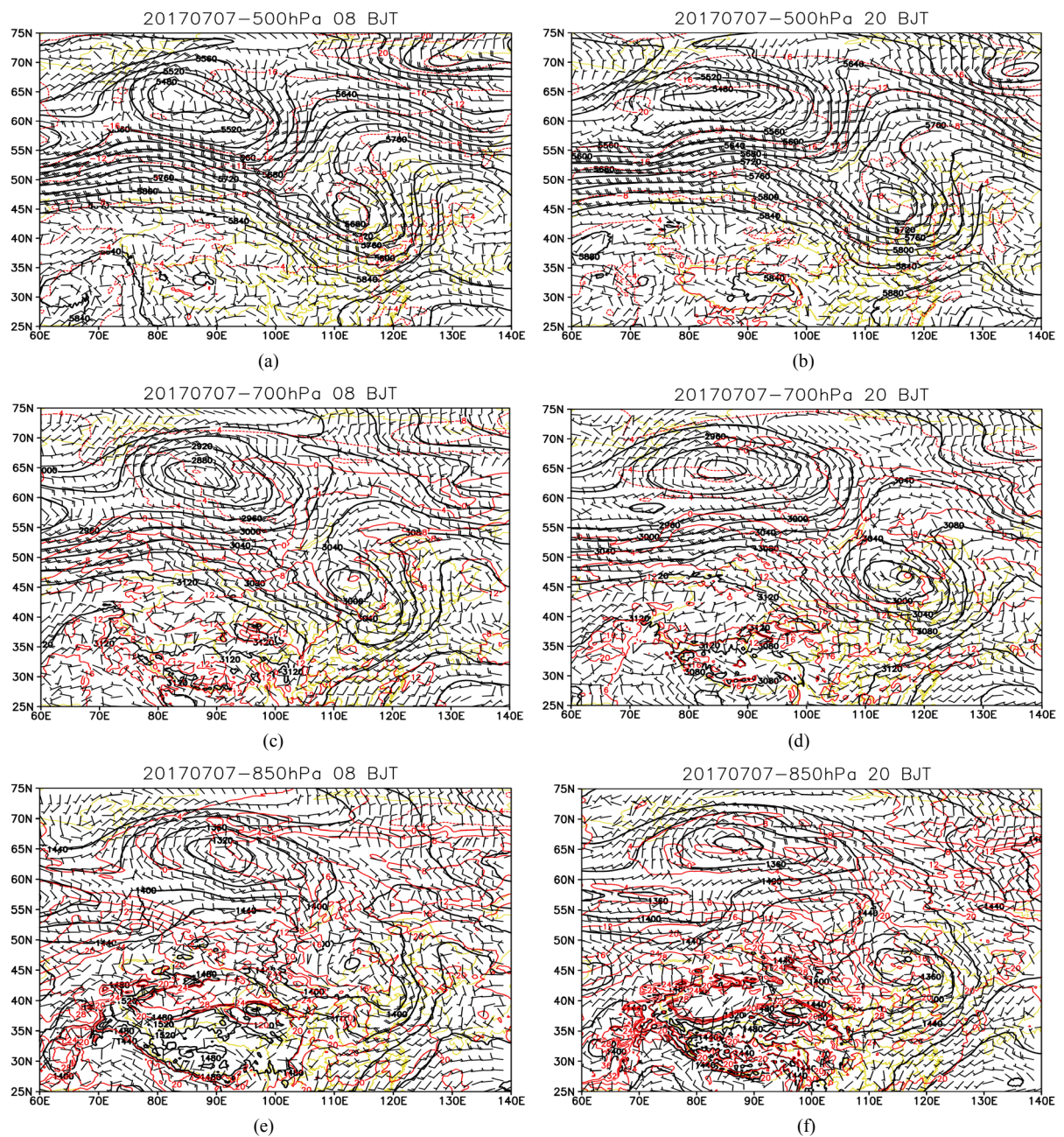
7月7日08时地面形势场上延庆受气旋辐合区控制,中心气压最低为994 hPa (图3(a))。白天气旋在东移过程中强度不断增强,14时气旋中心气压为990 hPa (图3(b)),17时气旋中心维持990 hPa (图3(c))。14~17时,地面天气图上的风场显示延庆北部地面辐合线建立并维持(图3(b)和图3(c)),由于地面辐合线附近易触发新生对流单体,从雷达回波图上也可看到17:30到19时有孤立的对流单体新生(图略),但由于无冷空气触发,对流未加强发展。此外,从图3(c)中地面17时的天气图上可以看到,延庆地区处于露点锋区($T_d \geq 20^\circ\text{C}$),而延庆以北的张家口地区露点相对较低。20时地面中尺度辐合线移动至延庆至怀柔

一带(图 3(d)), 此时强对流天气已开始影响延庆西北部。综上分析, 可知 14 时后, 地面延庆处于露点锋区上, 本区水汽条件较好, 且延庆北部始终存在风场辐合线, 环境场有利于对流发展。

3.2. 探空分析

对流有效位能(CAPE)表示的是环境大气内所含的不稳定能量情况。CAPE 越大, 表明环境为强对流天气发生储存了大量的不稳定能量。此外, 垂直风切变是影响对流性风暴组织和特征的最大因子, 是强对流天气预报的重要参数。

张家口站 08 时探空曲线显示该地区对流有效位能 CAPE 为 219 J/Kg, K 指数为 28 (图略)。订正该站探空, 即将抬升温度设置为延庆站 14 时地面气温 30℃, 此时订正后的张家口站对流有效位能 CAPE 升



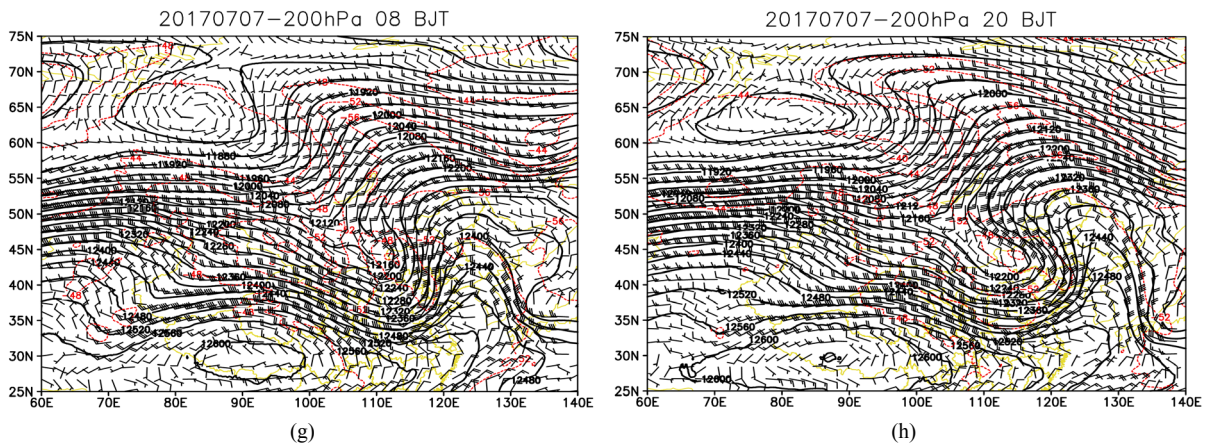
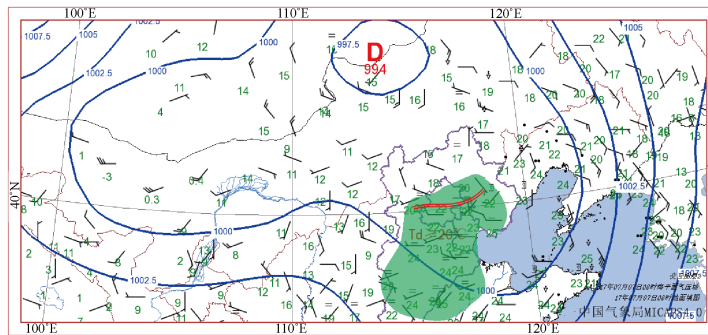
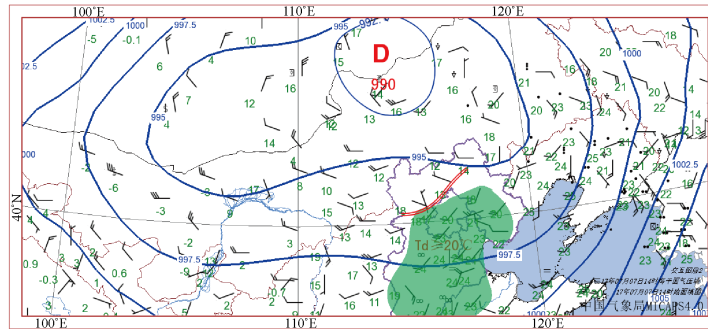


Figure 2. The distribution of upper weather charts at 08 am and 20 pm on 7th July 2017 (geopotential unit: gpm ; temperature unit: °C; wind speed: m/s)

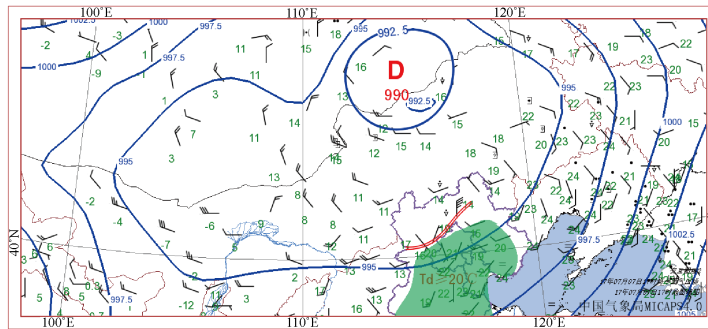
图 2. 2017 年 7 月 7 日 08 时、20 时高空天气形势场(高度场: gpm; 温度: °C; 风速: m/s)



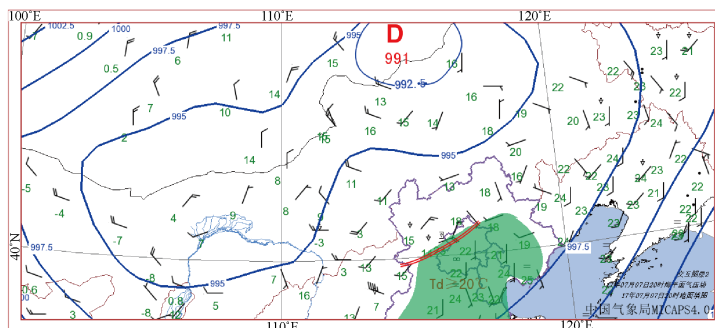
(a) 7 月 7 日 08 时地面天气图



(b) 7 月 7 日 14 时地面天气图



(c) 7 月 7 日 17 时地面天气图



(d) 7月7日20时地面天气图

Figure 3. The surface weather chart on 7th July 2017. (a) 08 am, (b) 14 pm, (c) 17 pm, (d) 20 pm**图3.** 2017年7月7日08时至20时((a)08时, (b)14时, (c)17时, (d)20时)地面天气形势图

至 2084 J/Kg, 垂直风速切变为 16 m/s, 为中等强度。此外张家口站 14 时地面气温升至 28℃, 露点温度升至 18℃, 表明本地具有一定水汽条件, 高层无明显水汽输送, 也呈现出低层偏暖湿、高层较干冷的特点。

北京站 08 时对流有效位能 CAPE 为 267 J/Kg, K 指数为 22, 表明中层水汽条件一般, 且低层到中层均为西北风(图略)。午后 14 时(图 4)探空显示近地面层风向为西南风, 850 hPa 为偏西风, 700 hPa 为西北风, 低层风向随高度顺时针旋转, 低层有明显暖平流, 500 hPa 为西北风, 到高层 200 hPa 逐渐转为西南风, 即高层风向随高度逆时针旋转, 有明显冷平流, 且 850 hPa 和 500 hPa 的温差达 29℃, 这样低层暖、高层冷的不稳定结构, 有利于对流天气发生; 同时午后 14 时对流有效位能 CAPE 升至 2820 J/kg, 对流抑制能量减弱为 0, 垂直风速切变达到 22 m/s, 属于中等到强类型; 本地低层水汽条件较好, 近地层 925 hPa 以下露点在 20℃, 但中高层水汽条件较差, 探空表现出“喇叭口”状结构, 表明北京地区大气环境极不稳定, 容易发生对流天气。表 1 给出了延庆和张家口站相关对流特征具体参数。

Table 1. The air sounding parameters of Beijing (Station ID: 54511) and Zhangjiakou (Station ID: 54401) on 7th July 2017
表 1. 2017 年 7 月 7 日 08 时和 14 时北京和张家口站探空参数

时间	北京 54511 站			张家口 54401 站(14 时订正到延庆站)		
	对流有效位能 (J/Kg)	0℃层高度/m	-20℃层高度/m	对流有效位能 (J/Kg)	0℃层高度/m	-20℃层高度/m
08 时	267	4634	7828	219	4375	7680
14 时	2820	4608	7695	2084	/	/

4. 雷达和云图特征

2017 年 7 月 7 日 17:36 分至 19:30 分期间, 海陀山西北部有孤立的对流单体南下移动到延庆城区, 但均未加强发展, 分析雷达回波和 VRADS 反演风场图(图略), 可以发现, 在无冷空气配合且环境场相对稳定情况下, 该期间出现在延庆地区上空的孤立对流单体并未发展加强。19:36 分至 20:30 分, 海陀山西侧的强风暴单体南下期间不断加强发展, 中心强度持续在 55 dbz 以上, 并快速发展为超级单体风暴(图略)。下面将分别对对流发展的关键时间点的雷达回波特征进行详细分析, 以期加深认识强对流发生发展的雷达和云图特征。

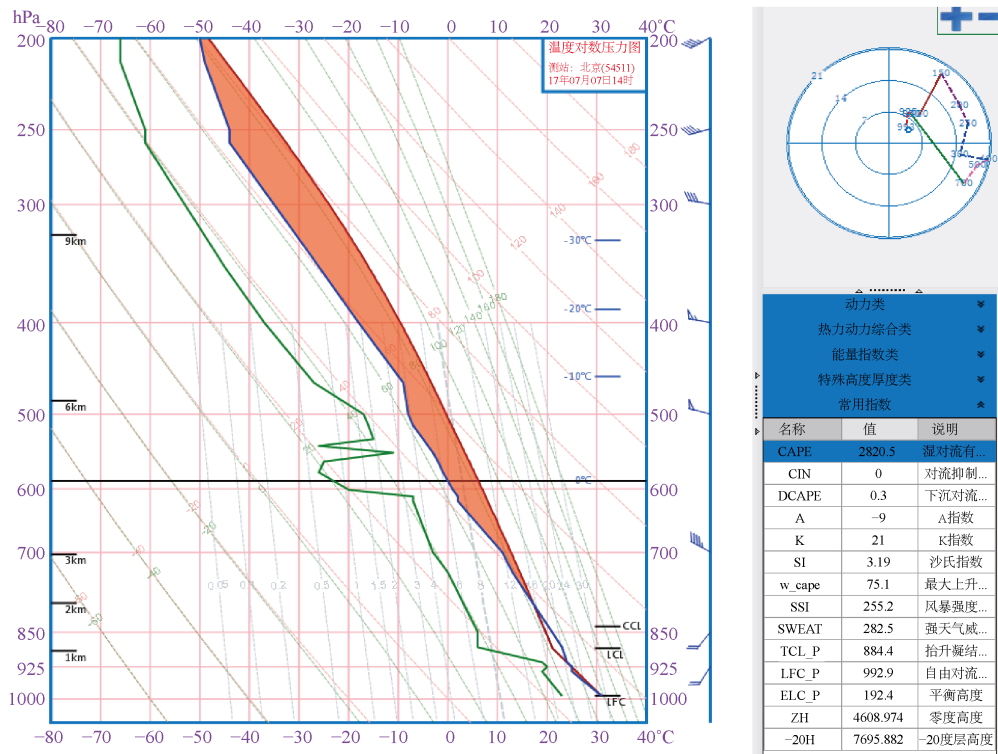
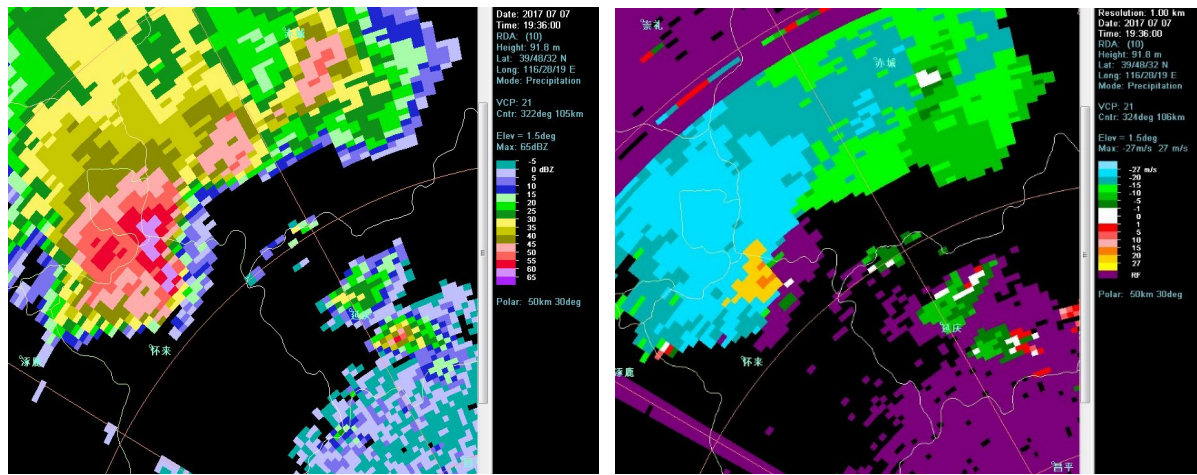
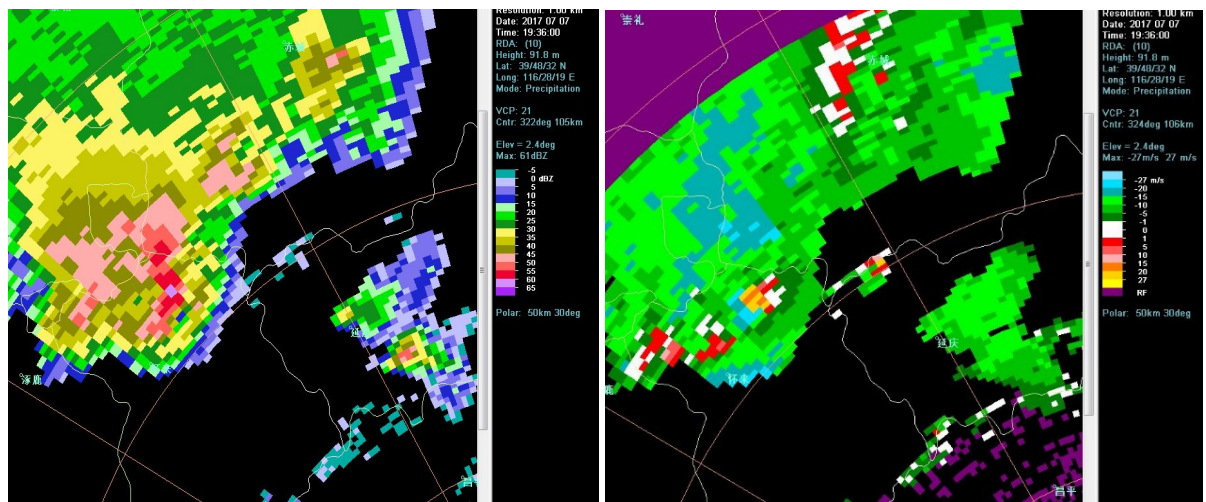


Figure 4. The air sounding at 14:00 pm of Beijing (Station ID: 54511) on 7th July 2017
 图 4. 2017 年 7 月 7 日北京 54511 站 14 时探空图

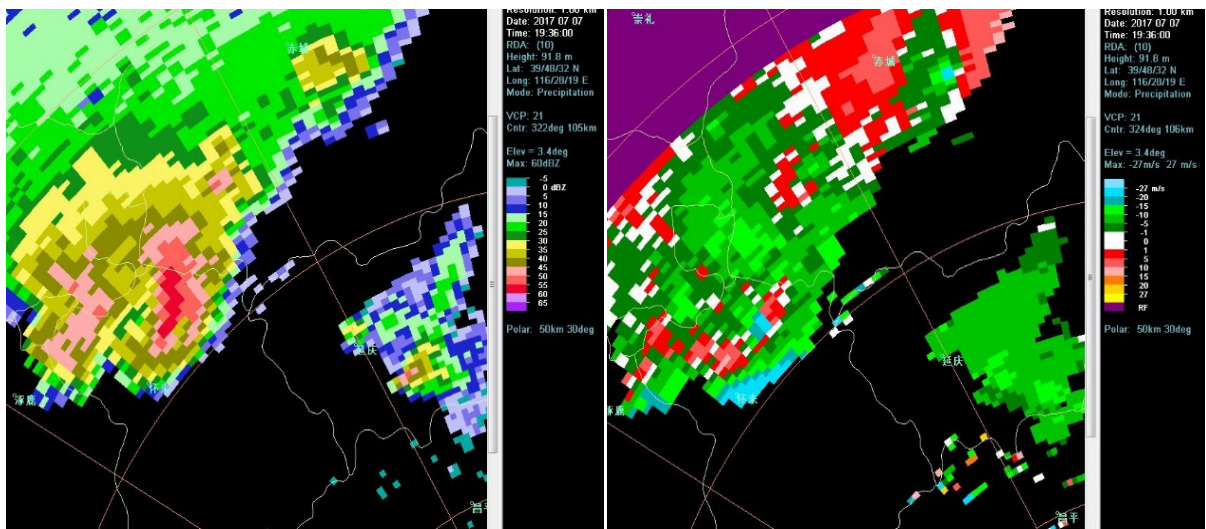
19 时 36 分，雷达基本反射率因子图显示(图 5(a)左，图 5(b)左，图 5(c)左，图 5(d)左)，反射率因子从低仰角到高仰角向南倾斜，回波顶移过低层反射率因子的高梯度区，即风暴顶位于有界弱回波区之上。径向速度图上(图 5(a)右，图 5(b)右，图 5(c)右，图 5(d)右)，低层 0.5° (图略)和 1.5° 仰角(图 5(a)右)径向速度出现了速度模糊现象，2.4°和 3.4° 上有正负速度对存在(图 5(b)右和图 5(c)右)。19:36 分，反射率因子垂直剖面(图 5(e))表明存在回波悬垂，强度达 55 dbz 以上反射率因子核发展到 9 km 高度；60 dbz 强反射率因子对应的垂直积分液态水含量在 60 kg/m² 以上(图 5(f))。19:42 分至 19:54 分，延庆北部地区对流单体加强发展为超级单体(图略)。



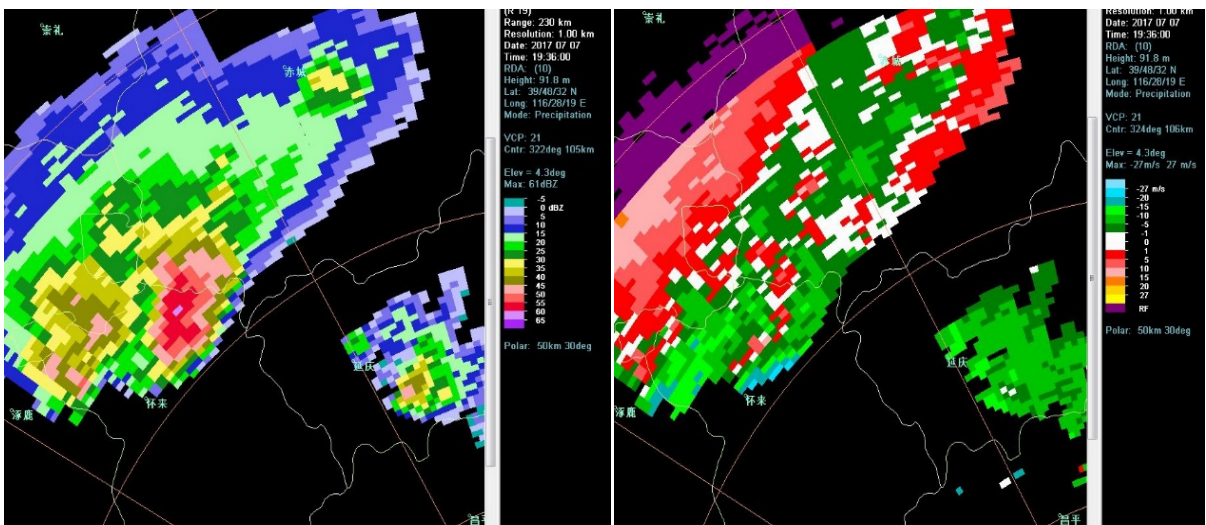
(a) 1.5°



(b) 2.4°



(c) 3.4°



(d) 4.3°

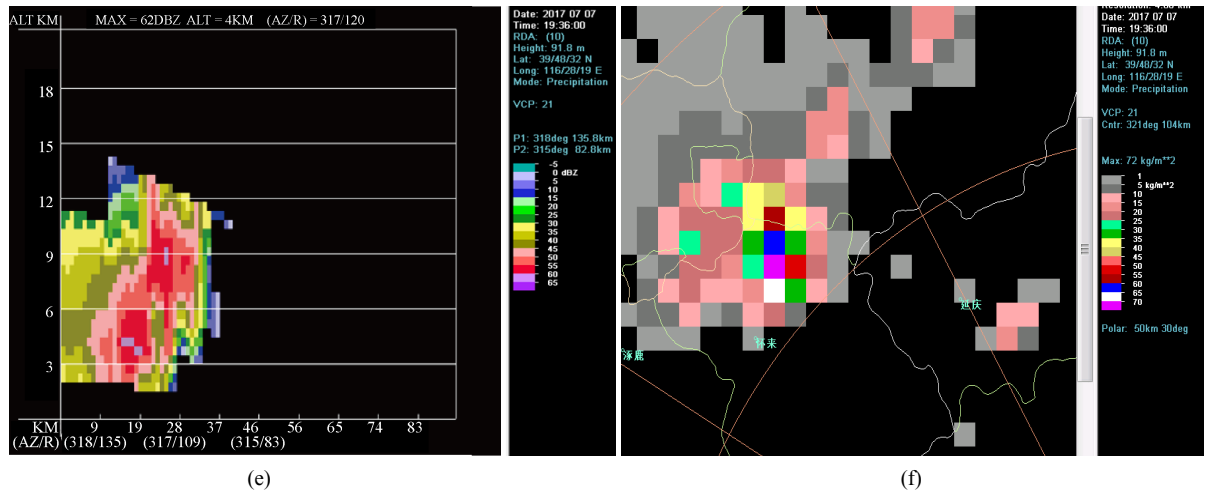


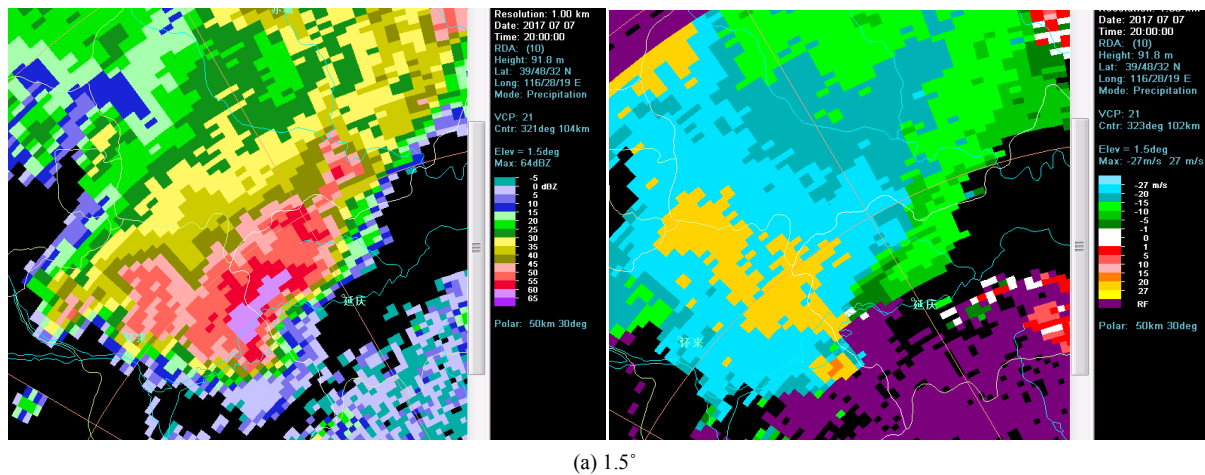
Figure 5. Different elevations (a: 1.5°, b: 2.4°, c: 3.4°, d: 4.3°) of base reflectivity (left), and radial velocity (right), and the radar cross section (e), and vertical integrated liquid water content (f) at 19:36 7th July 2017

图 5. 2017 年 7 月 7 日 19 时 36 分不同仰角(a: 1.5°, b: 2.4°, c: 3.4°, d: 4.3°)雷达回波基本反射率因子(左)和径向速度(右), 对应时刻反射率因子垂直剖面图(e)和垂直积分液态水含量图(f)

20:00 时, 1.5°仰角反射率因子图上(图 6(a)左)呈现钩状回波特征, 前测有明显的入流 V 型缺口, 对应强盛的上升气流区, 对应风廓线雷达上明显看到东南风加大, 回波顶位于低层强反射率因子梯度区上空(图 6(a)左, 图 6(b)左, 图 6(c)左, 图 6(d)左)。径向速度 1.5°仰角图上(图 6(a)右)有明显速度模糊, 2.4°和 3.4°有正负速度对(图 6(b)右, 图 6(c)右); 雷达回波垂直剖面(图 6(e))表明此时仍然具有回波悬垂结构, 强反射率因子发展到 10 km; 垂直积分液态水含量 VIL 值在钩状回波强中心处达到 55 kg/m² (图略)。

17:40 分, 云图显示(图略)上游张家口北部地区出现分散的块状对流云团, 此时, 延庆地区上空仍然为晴空区域, 表明大气环境相对较稳定。19:10 分(图 7(a)), 张家口地区对流云团加强发展为“V”形的风雹云团, 这种对流云团往往预示着将有雷暴、大风、冰雹等强对流天气可能发生。19:40 分至 20:00 (图 7(b)), 对流云团继续东移南下强度加强, 形状维持, 开始影响延庆。

图 8 为延庆站 7 日下午 18 时至 21 时的风廓线垂直风场特征, 可以看到, 19 时 30 分前(北京时), 低层为东南风, 受偏东暖湿气流影响, 延庆地区地面比湿值达到 18 g/kg, 在近地面层已经积累了充足的水汽; 19 时 30 分至 20 时期间, 此时低层风向由东南转为西南风, 并且从 1000 米到高层 5000 米一致出现西南风; 20 时后, 在对流风暴南下开始影响延庆西北部乡镇区域时, 风廓线近地层风再次出现风向跳变,



(a) 1.5°

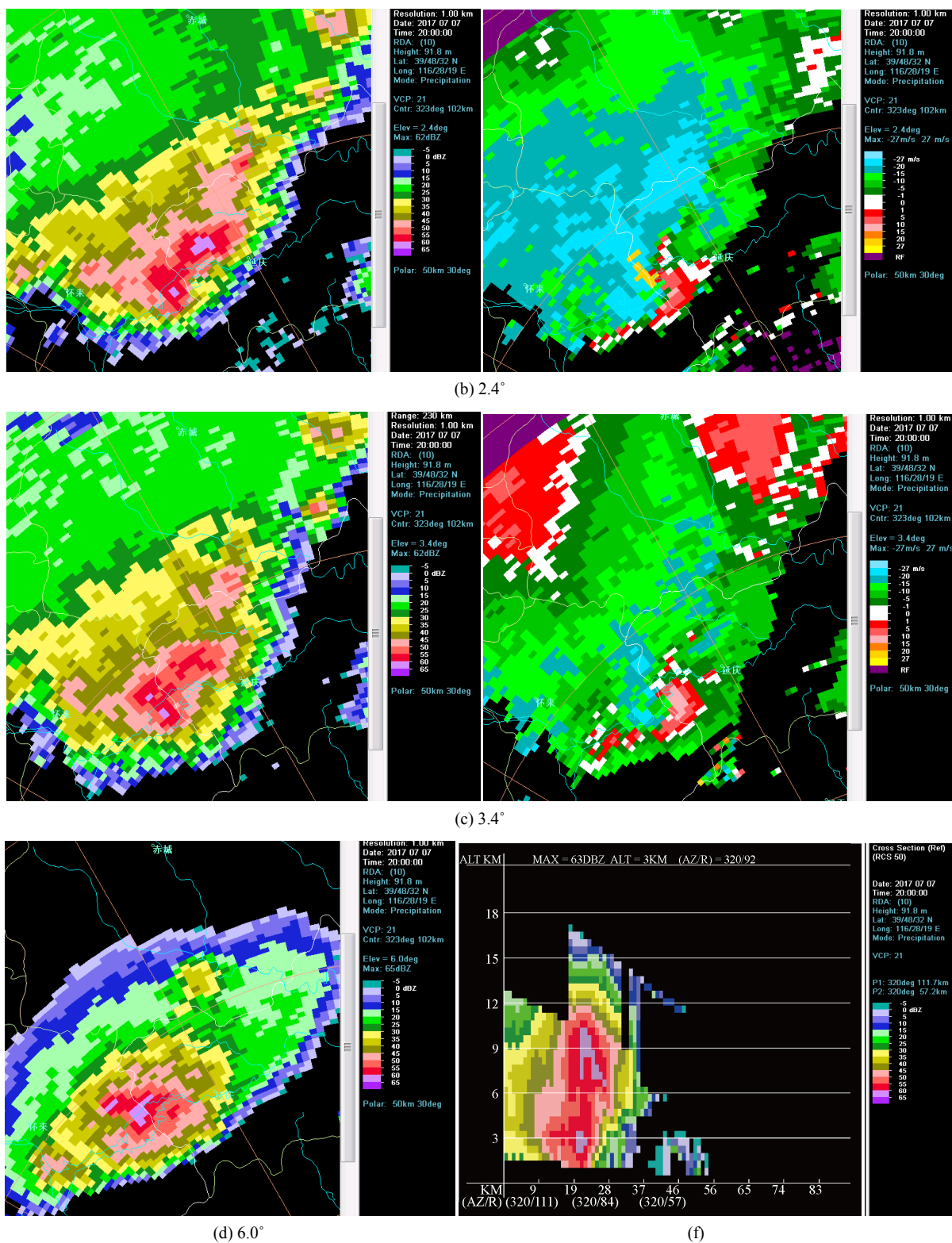


Figure 6. Different elevations (a: 1.5°, b: 2.4°, c: 3.4°, d: 6.0°) of base reflectivity (left), and radial velocity (right), and the radar cross section (e), and vertical integrated liquid water content (f) at 20:00 7th July 2017

图 6. 2017 年 7 月 7 日 20:00 不同仰角(a: 1.5°, b: 2.4°, c: 3.4°, d: 6.0°)雷达基本反射率因子(左)、径向速度(右)和对应时刻反射率垂直剖面(e)

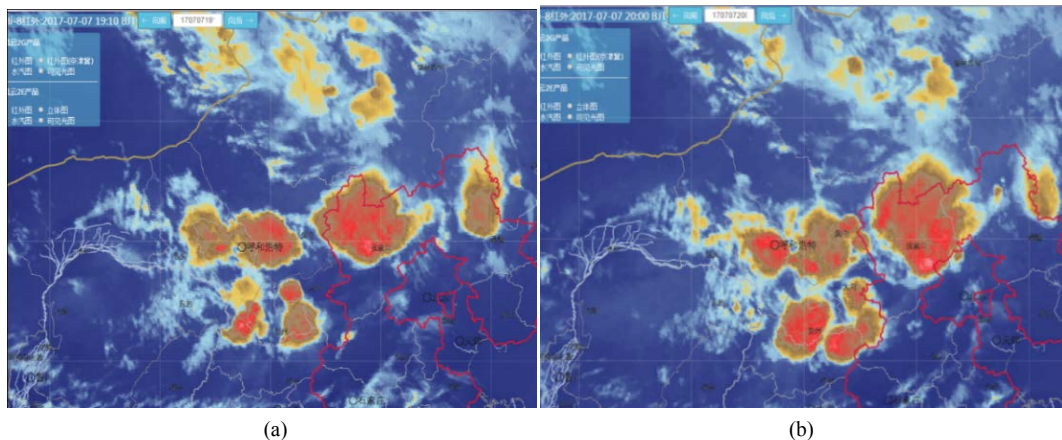


Figure 7. The satellite infrared image at 19:10 (a) and 20:00 (b)
图 7. 2017 年 7 月 7 日红外云图 19:10 (a), 20:00 (b)

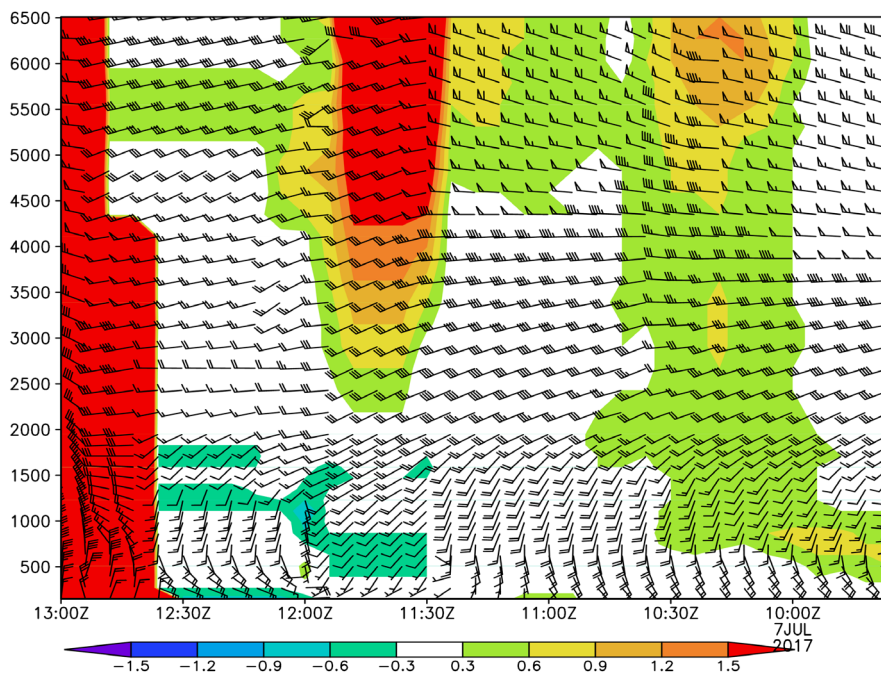


Figure 8. The variation features of Wind profile radar from 10:00 to 13:00 (the abscissa is UTC time, and the interval is 6 min, the ordinate is the height, unit: metre) on 7th July 2017
图 8. 延庆站 2017 年 7 月 7 日 10~13 时(世界时)风廓线雷达(横坐标为时间,间隔 6 分钟;纵坐标为高度,单位:米)

由西南风转为东南风,此时延庆处于超级单体风暴前部的强上升气流区;20 时 36 分后,对流风暴主体移到延庆城区以南地区时,延庆城区上空的冷空气下沉至近地面,此时城区延庆站的降水减弱趋于结束。

5. 基层预报预警服务工作探讨

针对此次强对流天气,延庆区气象台于 2017 年 07 月 07 日 18 时 03 分发布雷电黄色预警信号:预计当前至 8 日 00 时,延庆区将出现雷阵雨天气,有雷电活动,并伴有短时大风,请注意防范。预警信号存在的问题一是内容未提及局地短时强降水和冰雹,二是虽然雷电黄色预警信号发布时间较早,但不全面,这可能是由于预报员关注到 18 时左右前影响延庆地区的对流单体均减弱移出,且比较孤立分散,从而未

能对上游张家口地区对流云团的重视,未能进一步跟进分析研判。

从预报服务方面来看,存在两方面问题:一是基层预报服务人员力量不足,近5年来,汛期当预报有降雨或突发有强对流天气时,从早到晚随时会有延庆市民拨打电话,咨询天气情况,尤其在灾害天气正发生期间,基层业务人员不仅要及时接听各类服务电话,还要做好常规预报预警服务工作,1个预报服务人员难以专心研判天气形势的变化。二是基层业务人员短临预报预警能力还亟需提升,此次强对流天气过程的事后分析中可以发现,其实在傍晚19时36~54分期间,如果预报服务人员具备较好短临预报服务能力,通过雷达回波特征和其变化趋势,可以在20时前作出上游降雨云团将加强发展的判断。因此,基层预报服务人员需要加强短临业务学习与培训,不断提升短临服务技能。

实际工作中针对大风灾害天气,可通过共享的上游与周边自动站实况信息和对流云图形状等进行提前判断,但针对冰雹天气发生的提前研判,依然存在一定的困难。2017年7月7日这次过程期间,由于回波发展加强的区域,距离赤城和怀来气象站有一定距离,未能第一时间获取上游冰雹灾情信息,因此,对冰雹预报预警,一方面需要通过潜势分析和临近的雷达、云图以及加密观测站和资料变化特征来进行分析,另一方面要加强与各乡镇各村的气象信息员沟通联动,一旦发现立即上报,进而预报服务人员可及时发布预警,尽可能减轻社会影响。此外,夏季预报有降雨天气时,还应主动提前向政府决策部门报告将可能出现大风、冰雹、短时强降雨等系列灾害天气,提前做好防御准备。

综上分析,由于延庆地区处于强对流系统最先影响区域,加之复杂下垫面地形特征,任何一次对流天气的预报预警服务,业务人员需要坚持分区域、分时段、分强度和递进式预报、渐进式预警、跟进式服务的工作理念,加强与首席会商,加强与上游台站沟通,及时滚动更新预报,发布预警信号。

6. 小结与讨论

1) 2017年7月7日早晨北京地区高空受500 hPa冷涡底部偏西气流控制,温度槽落后于高度槽位于内蒙古中部,冷涡缓慢东移南压,强度显著增强;700 hPa冷涡中心稳定维持在内蒙古北部地区,北京受冷涡底部西北气流影响,20时前后850 hPa切变线位于张家口上空,此时天气系统具有前倾结构,且低空西南急流风速显著增大到16 m/s;地面上,北京延庆始终受到气旋辐合区影响,午后14~17时延庆北部存在中尺度风速辐合线,处于露点锋区上,因此天气尺度和中尺度环境场均有利于午后对流的触发和发展。

2) 探空曲线表明,2017年7月7日傍晚超级单体风暴出现前,14时北京站和张家口站订正探空均表现出上干冷、下暖湿的对流不稳定层结特征,且存在中等到强的垂直风速切变(16~22 m/s),对流有效位能CAPE达到2000 J/kg以上,0℃层和-20℃层高度适宜冰雹的形成。

3) 雷达基本反射率因子和径向速度特征分析表明,此次对流单体自张家口地区南下,在怀来盆地的北部区域加强发展为超级单体,雷达回波图上表现出钩状回波和弱回波区,强反射率因子发展高度达到9~10 km以上高度,中高层存在回波悬垂,反射率因子大值区对应着大的垂直积分液态水含量。红外云图上,对流云团呈现出“V”形的风雹云特征。

4) 通过此次强对流天气预报预警服务工作探讨,任何一次高影响天气的预报预警服务工作,延庆地区业务人员需要始终坚持分区域、分时段、分强度和递进式预报、渐进式预警、跟进式服务的工作理念,加强与首席会商、与上游台站联动,不断滚动更新预报,及时发布预警信号。

参考文献

- [1] 王彦,于莉莉,李艳伟,等. 边界层辐合线对强对流系统形成和发展的作用[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 724-731.

- [2] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4): 400-411.
- [3] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊庭南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [4] 刘治国, 俞小鼎, 陶健红, 等. 青藏高原东北侧雹云单体最大垂直累积液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 609-620.
- [5] Wislson, J.W. and Reum, D. (1988) The Flare Echo: Reflectivity and Velocity Signature. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **5**, 197-205. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1988\)005<0197:TFERAV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1988)005<0197:TFERAV>2.0.CO;2)
- [6] Lemon, L.R. (2010) The Radar “Three-Body Scatter Spike”: An Operational Large-Hail Signature. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **13**, 327-340. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0327:TRTBSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0327:TRTBSS>2.0.CO;2)
- [7] 朱君鉴, 刁秀广, 黄秀韶. 一次冰雹风暴的 CINRAD/SA 产品分析[J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 579-589.
- [8] 朱君鉴, 刁秀广, 曲军, 等. 4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J]. 气象, 2008, 34(12): 21-26.