

多源高频次探测资料在北京强对流个例临近预报中的应用

何娜¹ 田野² 陈明轩³ 李林² 杨艺亚¹ 韩微²

1 北京市气象台, 北京 100097

2 北京市气象探测中心, 北京 100089

3 北京城市气象研究院, 北京 100089

提 要: 综合应用多源高频次探测资料, 对 2020 年 8 月 27 日北京一次局地突发强对流成因、发展及其在临近预报预警中的可用性进行了分析。研究使用了微波辐射计、风廓线雷达、S 波段多普勒雷达、X 波段双偏振雷达及三维闪电定位系统等资料, 分析了雷暴初生、发展及消亡阶段的演变特征及预警特征。结果表明: 微波辐射计反演的温度、湿度及稳定度参数 (K 指数、SI 指数) 在强对流发生前 30~120 min 出现显著变化, 有效指示能量积累; 风廓线雷达监测的垂直风切变增强和低层暖平流可提前 55~120 min 反映动力抬升条件; 两种雷达通过回波悬垂结构、质心高度变化及双偏振参数 (Z_{DR} 、 K_{DP}) 分析冰雹生长区, 冰雹及雷暴大风的预警提前量达 12~37 min; 闪电跃增信号 (2σ 算法) 与强对流天气 (冰雹、大风) 的对应性显著, 首次跃增对冰雹预警的提前量达 52 min。2020 年其他 4 次强对流个例验证表明, 多源高频次探测资料的协同应用可突破单一设备的观测局限, 动态追踪环境能量、风暴结构与闪电活动, 为短时临近预报预警提供有利参考。

关键词: 强对流, 多源高频次探测资料, 雷达, 微波辐射计, 闪电定位系统, 临近预报

中图分类号: P458 文献标识码: A DOI:

Application of Multi-Source High Frequency Detection Data to the Nowcast Local Severe Convection in Beijing

HE Na¹ TIAN Ye² CHEN Mingxuan³ LI Lin² YANG Yiya¹ HAN Wei²

1 Beijing Weather Forecast Centre, Beijing 100097

2 Beijing Municipal Meteorological Observation Center, Beijing Meteorological Service, Beijing 100089

3 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: This study comprehensively applied multi-source high-frequency observational data to analyze the genesis, development, and applicability in nowcasting and warning of a

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42275012, 42205091), 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J018), 中国气象局青年创新团队 (CMA2023QN10), 北京市科技计划课题 (Z221100005222012), 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2021Z034), 北京市气象局科技项目 (BMBKJ202001006), 北京市自然科学基金 (8244063)

作者简介: 何娜, 主要从事中尺度天气系统诊断分析及客观预报方法研究。E-mail: hena0105@163.com

通讯作者: 陈明轩, 主要从事雷达资料同化反演及强对流天气临近预报技术研究。E-mail: mxchen@ium.cn

localized severe convective event that occurred in Beijing on August 27, 2020. Utilizing various high-frequency detection instruments including microwave radiometers, wind profile radars, S-band Doppler radars, X-band dual-polarization radars, and a three-dimensional lightning positioning system, the evolutionary characteristics and warning indicators during thunderstorm initiation, development, and dissipation stages were investigated. The results demonstrated: 1) Microwave radiometer-retrieved temperature, humidity, and stability parameters (K-index, SI-index) showed significant variations 30-120 minutes prior to the convective outbreak, effectively indicating energy accumulation. 2) Enhanced vertical wind shear and low-level warm advection detected by wind profile radars provided 55-120 minute lead time in reflecting dynamic lifting conditions. 3) S/X-band radar observations of echo overhang structures, centroid height variations, and dual-polarization parameters (Z_{DR} , K_{DP}) enabled identification of hail growth regions, achieving 12-37 minutes lead time for hail and severe wind warnings. 4) Lightning jump signals (2σ algorithm) exhibited strong correlation with severe weather (hail and winds), with the first jump providing 52-minute warning lead time for hail. Validation with four other 2020 convective cases confirmed that synergistic application of multi-source observations can overcome limitations of single-instrument detection, enabling dynamic tracking of environmental energy, storm structure, and lightning activities, thereby providing valuable references for short-term forecasting.

Key words: severe convective weather, multi-source high-frequency observational data, radar, microwave radiometer, lightning detection system, nowcasting

前 言

强对流是北京地区夏季的主要致灾天气，包括暴雨、破坏性大风、冰雹和龙卷等，对人民生命安全和城市运行等产生严重影响（孙继松等，2006；俞小鼎，2012；郑永光等，2017）。强对流天气具有生命史短、局地性强等特点，常规观测资料已无法满足当前临近预报的需求。新的观测技术手段提供了越来越多的高频次探测资料，不仅提供了更高时间频次的观测信息，还可获取更加丰富的中尺度系统垂直结构信息，揭示强对流系统在发展阶段的重要特征。国

外已通过多种加密立体观测试验数据分析和高分辨率数值模拟,在强对流天气成因和机理的认识方面取得了突破性进展,为中尺度数值预报模式的改进提供了重要的科学依据(Weckwerth et al, 2004; 2008; Weckwerth and Parsons, 2006; Wilson and Roberts, 2006; Xue and Martin, 2006a; 2006b; Browning et al, 2007; Wakimoto and Murphey, 2010; Wang and Xue, 2012)。国内学者也开展了针对高频次探测资料的研究,研究表明微波辐射计和风廓线雷达资料能够较好地反演对流天气发生前的环境场特征,特别是垂直层次上的温度、湿度变化以及垂直风场变化(古红萍等, 2008; 李妙英等, 2013; 曾瑾瑜等, 2014; 邹德龙等, 2019)。魏东等(2011)研究发现,微波辐射计和风廓线雷达分钟级数据对强对流天气发生前环境场特征具有很好的指示作用。郑栋等(2010)指出,闪电作为对流活动的反应,与强对流天气关系密切,现已成为气象监测的重要数据源,广泛应用于强对流天气监测(郑永光等, 2015)。Bringi and Chandrasekar(2010)提出,双偏振雷达作为天气雷达的新技术之一,除了能测量常规的反射率因子、径向速度和速度谱宽外,还能获取差分反射率、零时滞相关系数、差分传播相移、差分传播相移率等双偏振参量。双偏振雷达具有扫描速度快、空间分辨率高等优势,已被逐步引入业务应用。通过整合 X 波段双偏振雷达和 S 波段雷达,北京形成了多波段雷达组网,并取得了良好的业务应用效果(吴翀等, 2021)。

近年来,北京已建设多种高频次探测设备(如多部 X 波段双偏振雷达、风廓线雷达、微波辐射计、云雷达等),并构建了稠密的自动站网,形成了覆盖北京的高时空分辨率气象探测网。目前,针对这些高频次观测资料和设备的研究大多集中于单一仪器在特定天气个例中的应用(郑石等, 2011; 姚静, 2012; 董保举等, 2012; 翟亮等, 2012; 何娜等, 2014; 汪学渊等, 2016),或者是对仪器的定量检验与评估(邓闯等, 2012; 董丽萍等, 2014; 王辉等, 2019; 叶飞等, 2020)。如何在强对流监测、预报预警中综合使用多源高时空分辨率探测资料,从而有效提高预报的准确率和预警提前量,已成为亟待解决的问题。

综合应用多源高频次探测资料,分析了 2020 年 8 月 27 日北京一次局地强对流天气的成因、发展及其在临近预报预警中的可用性。同时,选取 2020 年其他 4 次局地强对流天气过程,对多源高频次探测资料的可用性做进一步验证,为此类资料在局地突发强对流天气的临近预报预警业务中的综合应用提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

资料来源于高空与地面观测、北京地面加密自动站、观象台 S 波段多普勒雷达(以下

简称 S 波段雷达)、房山 X 波段双偏振雷达(以下简称 X 波段雷达)、延庆风廓线雷达、延庆微波辐射计以及北京三维闪电定位系统等观测,仪器分布如图 1 所示。表 1 为本文所使用设备的主要技术参数。

关于微波辐射计(田野等, 2022)、风廓线雷达(邓闯等, 2012)以及北京 S 波段雷达和 X 波段雷达产品(吴翀等, 2021)已有相关应用研究,而本次过程主要影响系统位于东部,气团的性质更加一致,因此选用位于平原地区的观象台探空资料进行数据质量控制。延庆微波辐射计和延庆地面自动站组成的虚拟探空和观象台探空形态相似,李建强等(2017)、孙艳桥等(2019)对相同型号的微波辐射计也进行过质量控制,表明在晴空背景下数据相关性最好,云天次之,降水较晴空和云天稍差。在两段探空时间间隔内(09:00—14:00、15:00—17:00;北京时,下同),由于高空没有有效的观测值进行比对,因此使用地面自动站和微波辐射计地面站温湿压传感器观测数据进行检验,微波辐射计和自动站观测的露点温、水汽压和比湿,误差均较小。使用 14:00 南郊探空与延庆风廓线资料对比,垂直方向上的风速绝对偏差在 $0\sim 1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此认为风廓线资料质量也有保证。

此外,根据雷达资料计算,在 1.5° 和 2.3° 仰角时房山 X 波段雷达的数据实际灵敏度与理论灵敏度较为接近,数据质量可信;根据 Earth Networks 公司提供的理论模拟评估结果,北京三维闪电定位系统对北京及周边地区云闪的探测效率约为 80%;对京津冀地区的地闪探测效率 $>95\%$;对北京及周边地区地闪的定位精度 $<200\text{ m}$ 。

表 1 北京多源高频次探测设备类型及主要技术参数

Table 1 Types and main technical parameters of high frequency detection equipment in Beijing

资料类型	发射频率	时间频次/min	探测水平范围/km	垂直探测高度/m	水平分辨率
S 波段雷达	2700~2900 MHz	6	230	/	250 m
X 波段雷达	9300~9500 MHz	3	150	/	75 m
延庆风廓线雷达	60 MHz	6	/	12 030	/
延庆微波辐射计	K 频段(22~30 GHz)、 V 频段(51~59 GHz)	1	/	10 000	/
北京三维闪电定位系统	1 Hz~12 MHz	0.1	270	20 000	/

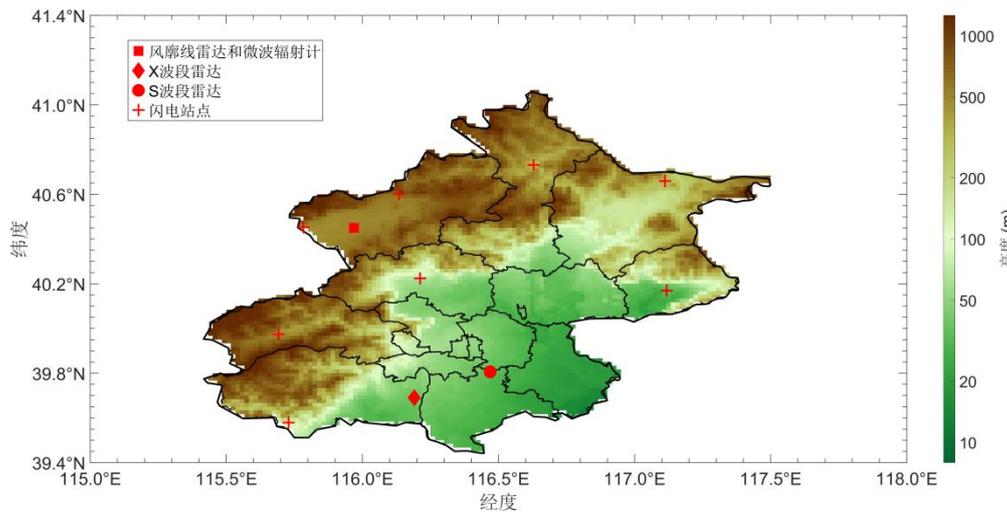


图 1 北京多源高频探测设备分布

Fig.1 Distribution of the multi-source high frequency detection equipment in Beijing area

1.2 风暴识别方法和闪电跃增计算方法

使用 TITAN (thunderstorm identification tracking analysis and nowcasting) 风暴识别方法对强对流单体进行识别。TITAN 是一种基于对象的雷暴单体识别、追踪、分析和预报方法 (Dixon and Wiener, 1993), 其主要优势在于对雷暴单体的三维识别与追踪。该方法的基本原理是将雷达极坐标系数据转换为笛卡尔坐标系数据 (1 km×1 km) 后, 分别从东西和南北方向寻找雷达体扫中组合反射率因子 ≥ 35 dBz 的格点。当标识区域内包含最大反射率因子 ≥ 45 dBz 的格点时, 则标记为强对流单体, 否则不予标记 (Dixon and Wiener, 1993; Tian et al, 2019; 曹伟华等, 2019; 田野等, 2021)。

目前,国际上普遍采用的闪电跃增算法主要有 Gatlin 算法 (Gatlin, 2008) 和 σ 算法 (Schultz et al, 2017)。根据田野等 (2021) 的研究结果, 在北京地区采用 2σ 闪电跃增算法 (即当前闪电频数变化率超过前期平均闪电频数变化率的两倍标准差) 能提供最佳灾害性天气预警效果。因此, 本文也采用 2σ 算法对强雷暴天气进行分析。在该算法中, 闪电次数为统计落在 TITAN 算法识别后的强对流单体网格内的总闪 (云闪+地闪) 次数。

2 天气实况与背景介绍

2.1 天气实况

2020 年 8 月 27 日 15:00—21:00, 北京地区出现了分散性雷阵雨, 西部、南部的降水较

为明显，延庆、门头沟局部地区出现暴雨（图 2a）。房山、大兴和延庆局地出现冰雹（17:19 延庆张山营，最大直径为 2 cm）和 6 级以上短时大风，最大风力达 10 级（18:34 房山城关， 25.2 m s^{-1} ，图 2b）。14:00—21:00，北京全市平均降水量为 1.9 mm，最大降水量出现在延庆玉渡山，达到 76.5 mm；最大小时降水量也出现在该站（17:00—18:00 降水量为 74.5 mm）。

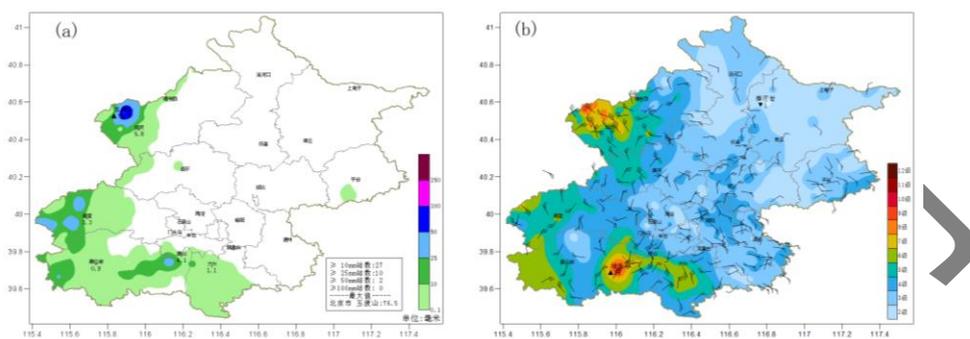


图 2 2020 年 8 月 27 日 15:00—21:00 北京地区(a)降水量，(b)极大风

Fig.2 (a) Precipitation and (b) extreme wind in Beijing from 15:00 BT to 21:00 BT on 27 August 2020

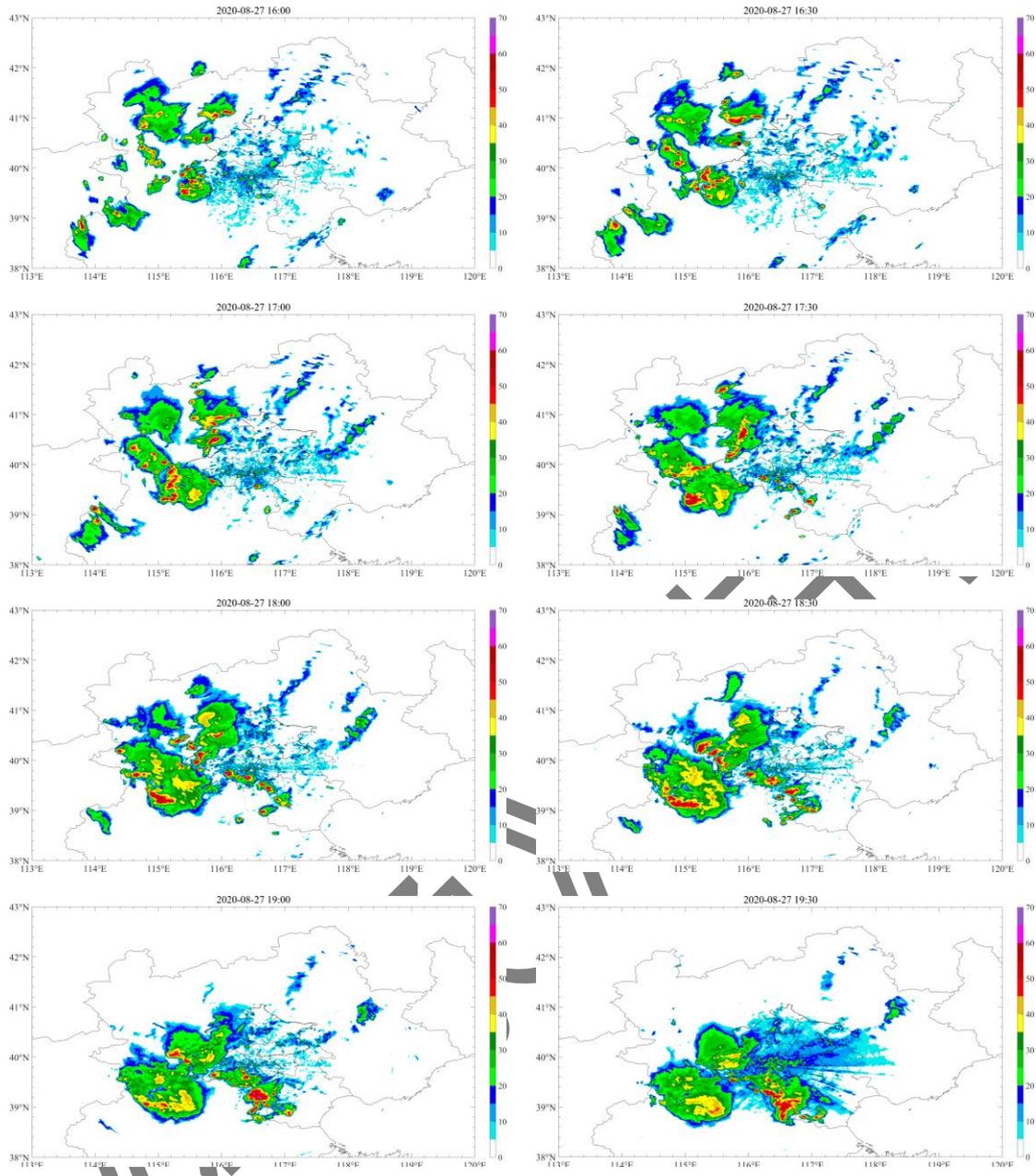


图 3 2020 年 8 月 27 日 16:00—19:30 逐 30 min 间隔雷达回波演变

Fig. 3 Evolution of radar echoes at 30-minute intervals from 16:00 to 19:30 on August 27, 2020

根据雷达回波的演变（图 3），16:00 前后，在北京西部山区延庆和门头沟一带开始触发对流，对流随着引导气流向西南方向移动，并逐渐增强；17:15 前后，丰台南部的雷暴，大兴东南部的雷暴进一步发展加强，房山东部雷暴也持续增强并向西南方向移动，19:15 前后减弱消散。

2.2 天气背景

27日08:00, 华北地区在“两低一高”的天气环流背景下, 蒙古国中部有一低涡, 辽宁南部黄海区域有2020年8号台风“巴威”, 北京处于台风外围东北气流带中。500、700、850 hPa和地面图中受外围偏东风的影响(图略)。午后, 低层风向由东北风转为偏东风, 北京西部沿山一带受地形影响, 动力抬升条件明显增强。此外, 北京南部形成了切变系统, 同样存在有利的动力抬升条件。白天低层湿度较差, 但随着台风低压系统的临近, 湿度条件有所好转, 14:00近地面比湿达到 15 g kg^{-1} , 表明空气中的绝对水汽含量较高, 有利于强降水的发生。从27日白天探空数据变化来看, 中午前后, 随着温度升高, 对流有效位能(CAPE)显著增加, 从 955 J kg^{-1} 升至 2007 J kg^{-1} , 对流抑制能量(CIN)降为 0 J kg^{-1} , 表明能量条件较好。0~6 km的垂直风切变(SHR6)一直小于 10 m s^{-1} , 表明对流的组织性不强, 出现大范围对流天气可能性较低。探空数据反演得到的 0°C 层高度为4012 m, 0°C 湿球温度(WBZ)高度为3345 m, -20°C 层高度为7458 m, 这些条件有利于冰雹的形成。下沉对流有效位能(DCAPE)较小, 表明发生大范围8级以上雷暴大风的可能性较低。尽管暖云厚度为1911 m, 但由于抬升凝结高度(LCL)和 0°C 层高度之间的相对湿度较小, 云体含水量不高, 因此不利于大面积短时强降水的发生(表2)。

表2 2020年8月27日北京探空物理量

Table 2 Sounding physical quantities in Beijing on 27 August 2020

时间 (BT)	CAPE /(J kg^{-1})	CIN /(J kg^{-1})	BLI / $^\circ\text{C}$	DCAPE /(J kg^{-1})	SHR6 /(m s^{-1})	LFC /hPa	0°C 层高 /m	WBZ /m	-20°C 层 /m
08:00	955	138	-3.7	12.5	1.1	789	4004	3483	7564

14:00	2007	0	-6.7	34.7	1.4	995	4012	3345	7458
20:00	573	131	-2.1	0.7	6.9	791	3880	3771	7390

3 多源高频次探测资料应用分析

3.1 微波辐射计分析

延庆微波辐射计反演的大气温度、相对湿度、水汽密度显示(图4),27日10:00—16:00,低层(主要在1000 m以下)持续增温(图4a),表明27日上午西北部地区大气层结逐渐变得更加不稳定。12:00,1000 m高度的气温约为20 °C,5000 m高度的气温约为-11 °C,温差达31 °C。14:00—16:30,随着地面热力状况的改善,地面温度增加到了约30 °C,1000 m以下的温度垂直递减率达 $1.0\text{ °C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,接近干绝热递减率,表明此时层结很不稳定,极易发生对流。对流层中低层气温垂直递减率大,不仅有助于产生较高的CAPE,促进对流的发生,还使得风暴中下沉气流与环境的温差加大,有利于雷暴大风、冰雹等强对流天气的形成。

水汽密度随高度增加而减小,低层的变化尤为显著。降水前近地层水汽密度接近 20 g m^{-3} ,1000 m下降到 10 g m^{-3} 左右。27日14:00开始,近地面至4000 m高度水汽密度缓慢增大,湿层逐渐增厚(图4b),为强对流系统提供了丰富的水汽供应,为风暴的发生发展提供了能量来源。在降水发生前,水汽积分总量逐渐缓慢增加,至降水发生前,增大至40 mm以上;然而,强降水发生之后,由于降水落地,导致整层水汽积分总量减少,降至约30 mm。相对湿度的垂直分布呈现上下层大、中层小的特征,14:00与观象台相对湿度的垂直分布特征相似(图4c)。08:00—16:00,3500~5000 m高度相对湿度为80%~85%。结合云雷达的观测(图略),可以看出中高层有云逐渐移入,相对湿度开始出现波动的时刻较降水发生提前了90 min。

利用微波辐射计反演计算得到的K指数和SI指数能够有效指示对流天气大气层结不稳定条件(Chan, 2009; 李聪等, 2017)。由图4d~4f可见,27日06:00开始,K指数在波动中持续增大,SI指数逐渐减小,表明大气层结不稳定性逐渐增大;16:00前后,K指数达到峰值,SI指数降至最小,表明此时大气层结最不稳定性。在强对流发生前30~90 min,K指数和SI指数经历了多次波动,多个波峰波谷交替出现,预示着延庆地区出现了强对流天气。

19:30 前后, K 指数迅速减小, SI 指数增大, 此后西北部雷暴明显减弱。

根据上述分析, 微波辐射计观测的物理量及计算出的 K 指数和 SI 指数变化, 能够提前 30~90 min 指示强对流天气的发生。

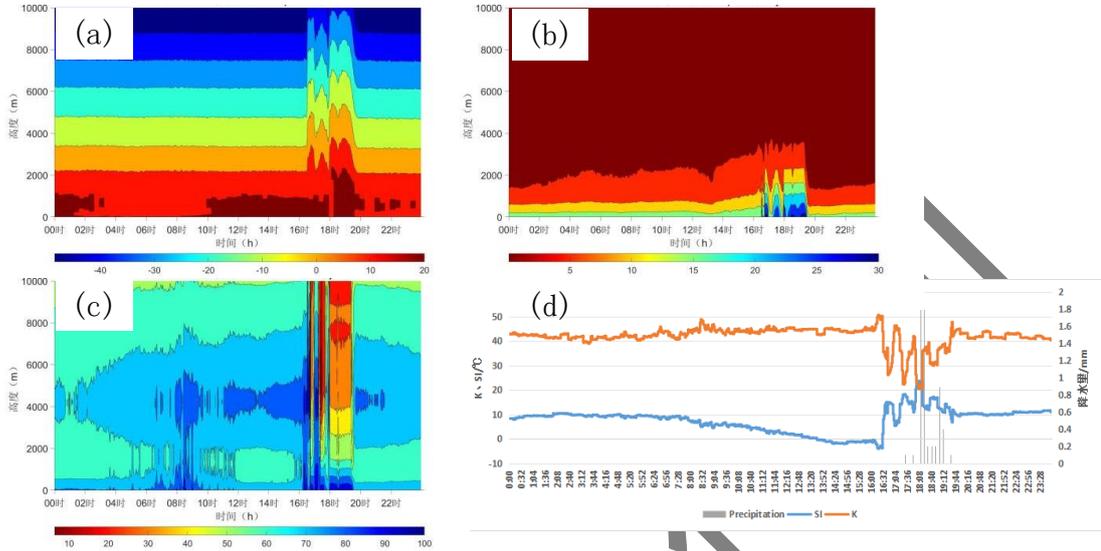


图 4 2020 年 8 月 27 日延庆微波辐射计的(a) 温度, (b) 水汽密度, (c) 相对湿度的时间-高度变化, (d) K 指数、SI 指数、降水量随时间的变化

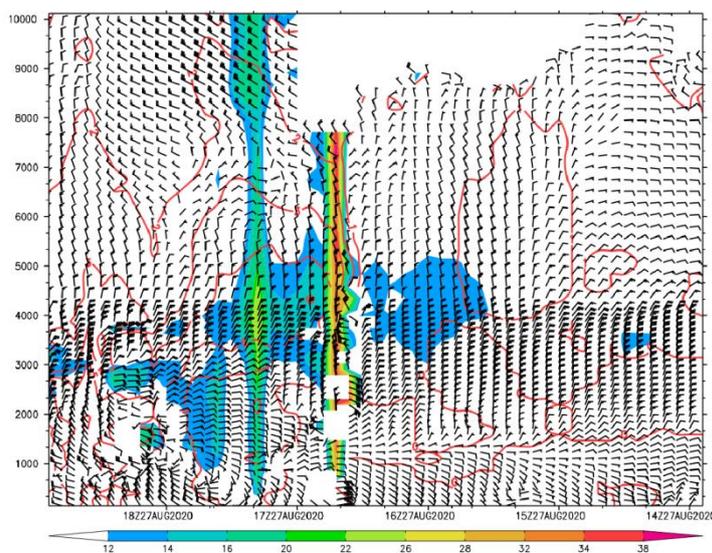
Fig.4 Time series of (a) temperature, (b) water vapor density, (c) relative humidity and parameters of stability (d) K-index and SI-index calculated by the microwave radiometer at Yanqing Station on August 27, 2020

3.2 风廓线雷达分析

由延庆垂直风廓线雷达时序演变可见 (图 5), 27 日上午, 受台风“巴威”外围气流的影响, 延庆近地层为东南风, 1100~1350 m 为偏东风, 1950~4350 m 为偏北风, 4350 m 以上维持偏东风, 直到 15:00 降水开始前风向转为偏北风。风向随高度变化呈逆转, 表明垂直方向上有冷平流。结合午后地面的明显增暖情况, 这种风场变化有利于层结热力不稳定性的增强。

27 日 16:00 之前, 地面维持 2 m s^{-1} 的偏东风或东南风, 3000~4000 m 高度处有 $10\sim 12 \text{ m s}^{-1}$ 的偏北风, 地面至 3000 m 附近高度间的风矢量差为 $12\sim 13 \text{ m s}^{-1}$, 形成中等强度的垂直风切变。延庆西侧有山脉阻挡, 偏东风在山前受地形影响产生强迫抬升。上升运动将暖湿的气流不断向上输送, 有利于对流的触发、加强和维持, 延庆地面自动站于 17:20 出现降水, 张山

营站在 17:05 出现降水。观测数据表明，0~3000 m 的垂直风切变有增大的趋势，较降水发生提前 5~20 min。风廓线中的湍流变化反映了环境风场中风速的脉动，可能是因为对流性降水云过境时，风廓线波束空间内降水粒子及环境大气运动分布存在的明显的非均匀性造成的（邓闯等，2012）。20:00 降水结束后，随着低层风向由偏东风转为西北风，3000~4000 m 高度的风向也由东北风转为偏北风，垂直风切变逐渐减弱，影响延庆的雷暴减弱并最终消散。



注:填色为垂直风切变，红色等值线为垂直速度，单位： m s^{-1} 。

图 5 2020 年 8 月 27 日延庆垂直风廓线（风羽）时间-高度变化

Shading indicates vertical wind shear in m s^{-1} , red contours represent vertical velocity in m s^{-1}

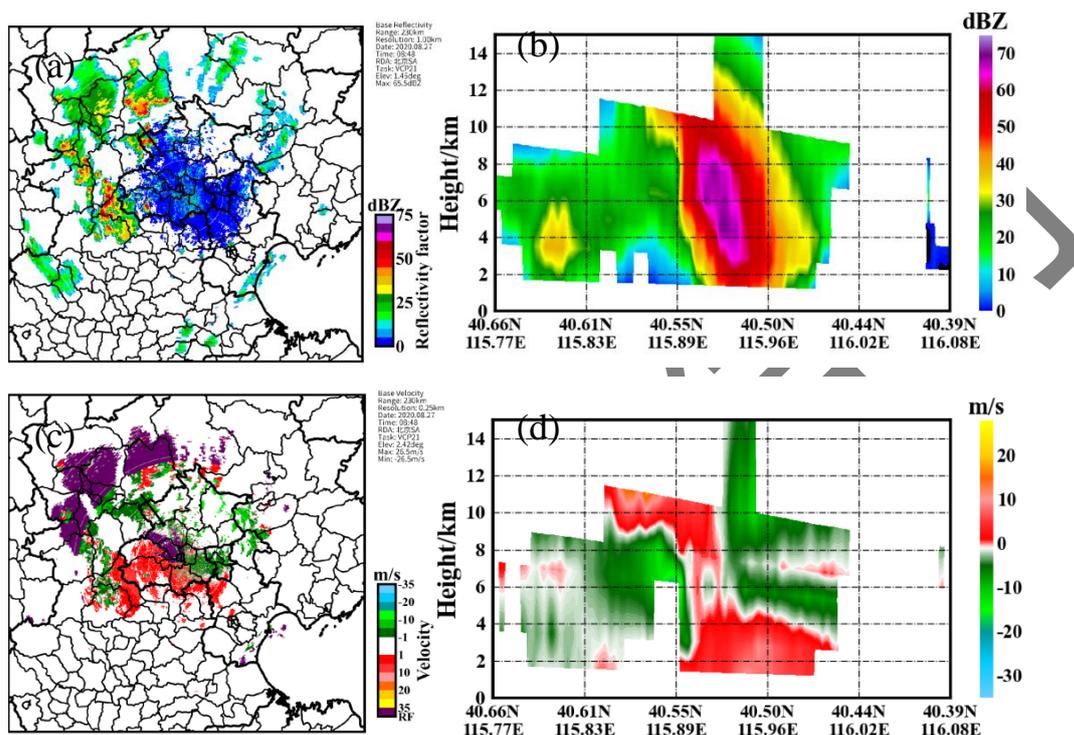
Fig.5 Time series of the vertical wind profile at Yanqing on 27 August 2020

3.3 S 波段、X 波段雷达与三维闪电系统分析

3.3.1 延庆强对流天气

27 日 16:00 前后，在延庆西北沿山地区有雷暴新生，组合反射率最强为 40 dBz，4 km 以下为离开雷达的径向速度，4 km 以上则为朝向雷达的速度（图略），同时，垂直方向上风切变增大，表明雷暴正在加强发展。根据延庆垂直风廓线的分布，16:00 前后，0~4 km 的垂直风切变有所增加，测站上空的大气风场呈现较强的局地不稳定，为雷暴的增强和发展提供了有利的环境条件。16:48，1.5°仰角下的反射率因子超过了 60 dBz（图 6a）。剖面图中显示回波顶高已超过 12 km（图 6b），速度图中低层出现强辐合（图 6c）。反射率因子达到 60 dBz 的强雷暴位于 3~9 km，覆盖了 0°C 层和 -20°C 层，低层存在辐合，10 km 以上存在辐散，斜升气流明显（图 6d）。结合微波辐射计的观测结果分析，低层暖湿气流的爬升促

使系统快速发展并加强，在这一阶段，雷暴一直处于生命史的成熟阶段；17:18时，强雷暴质心强度明显减弱至约 55 dBZ（图 6e），质心高度下降到 6 km 以下（图 6f），径向速度图（图 6g, 6h）显示强雷暴与下沉气流有关，表明整个雷暴开始塌陷。根据雷达资料，从 16:48 观测到强雷暴，至 17:19 延庆张山营观测到大冰雹，雷达资料剖面分析看出，从观测到强回波质心下降到冰雹落地存在约 30 min 的提前量。



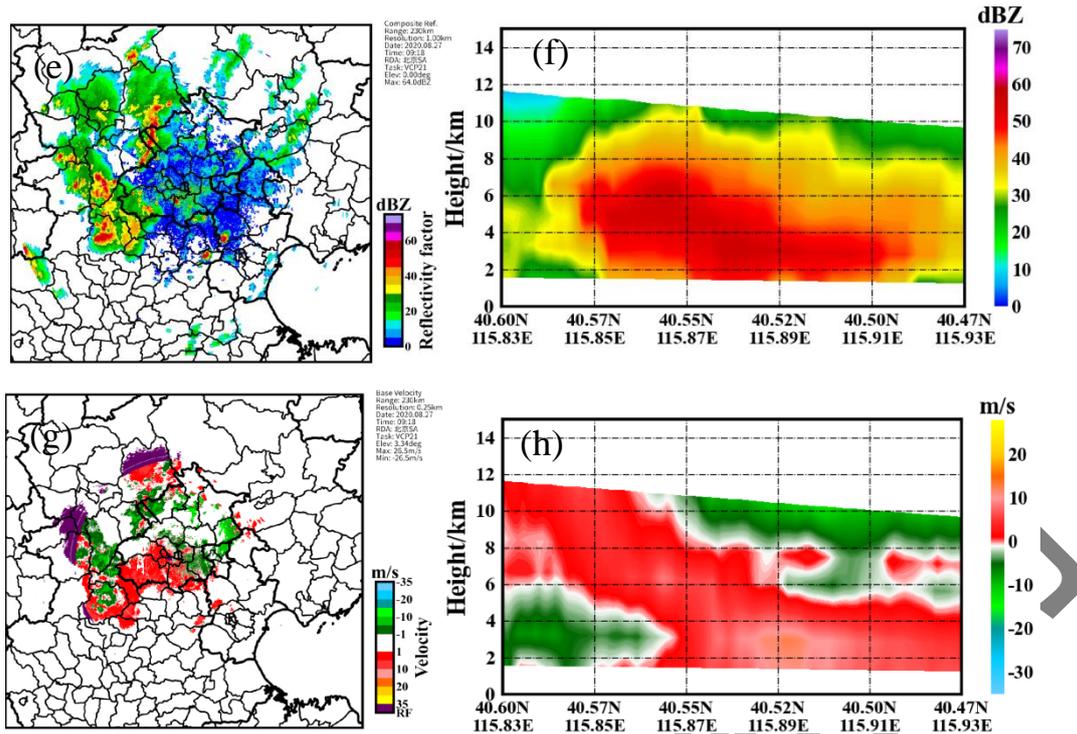
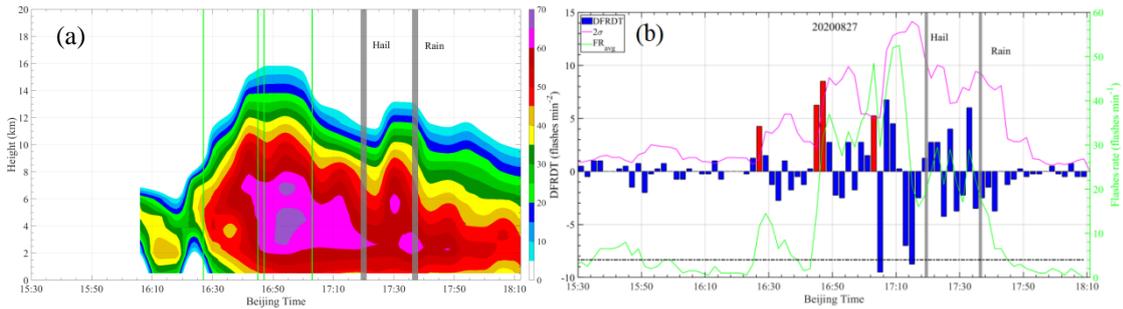


图 6 2020 年 8 月 27 日 (a~d) 16:48, (e~f) 17:18 北京 S 波段雷达(a,e)组合反射率因子, (b,f)分别沿(a,e)延庆强回波中心(黑色实线)的反射率因子剖面, (c,g)2.4°仰角径向速度, (d,h)2.4°仰角径向速度剖面

Fig. 6. Beijing S-band radar observations of a severe thunderstorm affecting the Yanqing area on August 27, 2020. (a~d) at 16:48 and (e~h) at 17:18, (a, e) composite Reflectivity (CR), (b, f) reflectivity cross-Section along (a,e), (c, g) radial velocity at 2.4° elevation angle, (d, h) radial velocity cross-section.

虽然雷达资料能够有效捕捉强对流系统的结构和变化特征,但在雷达处于低仰角或天气过顶时,往往存在探测盲区,结合闪电定位资料可以有效弥补此类观测盲区。而研究表明,闪电跃增现象对雷暴和强对流天气的预报预警有较好的指示作用(田野等, 2021)。使用 S 波段雷达资料结合闪电定位系统资料对延庆地区的强雷暴进行追踪,并记录闪电定位系统中闪电总数的跃增情况,以进一步验证雷电和雷暴发展的对应关系。从对延庆地区强雷暴的追踪结果(图 7a)来看,27 日 16:00 影响延庆地区的雷暴开始出现且强度不断增强;16:42 之后,50 dBz 回波高度发展到近 10 km,最强中心超过 65 dBz,位于 3.5~7.5 km,随后强中心随时间明显下降。16:42 观测到雷暴质心下降,至 17:19 延庆张山营镇出现冰雹,有 37 min 的时间提前量,再至 17:36 延庆张山营村观测到 30 mm h⁻¹ 强降水,有 54 min 的时间提前量。这期间,闪电频数分别在 16:27、16:45、16:47 和 17:03 发生了四次跃增(图 7b),从第一次观测到闪电跃增到冰雹发生的时间提前量为 52 min,较短时强降水的提前量为 69 min,

这表明闪电跃增观测对冰雹和强降水的临近预报有一定的指示意义。



注:图 a 中绿色实线代表闪电跃增时刻,灰色实线代表冰雹(Hail)、强降水(Rain)发生时刻;图 b 中红色柱状代表闪电跃增,蓝色柱状代表非跃增,绿色曲线表示闪电频数,黑色点划线表示闪电频数阈值,粉色曲线代表 2σ 值。

图 7 2020 年 8 月 27 日 15:30—18:10 延庆追踪的强雷暴(a)沿雷暴中心的反射率因子剖面(填色)和(b)单体内闪电跃增随时间的变化

Fig.7 Tracked strong thunderstorm in Yanqing region from 15:30 to 18:10 on August 27, 2020, (a) center profile (color-filled), (b) time series of lightning jumps within the thunderstorm cell

3.3.2 房山强对流天气

Seliga and Bringi (1976) 研究表明,雷暴单体的云微物理过程一直未受到足够关注,主要原因在于缺乏有效的观测手段。随着探测技术的不断进步,强对流风雹的云微物理过程的分析研究得到了大量观测资料的支持。X 波段雷达产品中含有相关系数(CC)、差分反射率(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})等观测资料,可为雷暴结构和相态粒子判别提供重要依据。

18:30(图 8),房山雷达观测到的最强组合反射率因子超过 50 dBz,沿强雷暴中心进行剖面分析发现,回波悬垂结构较明显,最强雷暴中心分别位于 4~6 km 和 2 km 左右。4 km 高度以下区域,CC 大多在 0.85~0.94, Z_{DR} 为 4~5 dB, K_{DP} 最大约 7° km^{-1} ,说明此处有冰雹下落。随着冰雹下落,融化过程产生的外包水膜现象使得 Z_{DR} 上升。结合 CC 的变化,可以发现冰雹所在区域 CC 明显下降,表明冰雹已融化,存在混合相态的水凝物。此外,冰雹的融化吸收了大量热量,导致风暴中下沉气流的温度降低,冷池增强,这有利于雷暴大风的形成。同时,冰雹的拖曳效应加剧了风暴下沉辐散气流的强度。通过分析径向速度剖面,可见强雷暴对应的下沉气流较强,18:34,风暴在房山城关站产生了 25.2 m s^{-1} (10 级)的雷暴大风。与单偏振雷达相比,双偏振雷达提供了更加丰富和精确的云微物理观测产品,为粒子相态的识别提供了更可靠的依据。综上所述,从强雷暴中心下沉到地面出现雷暴大风和冰雹有 24 min 的时间提前量。

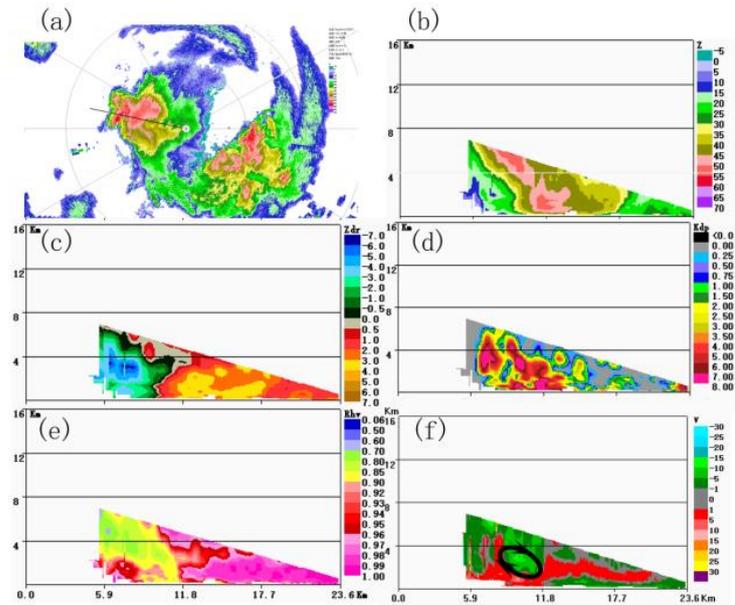
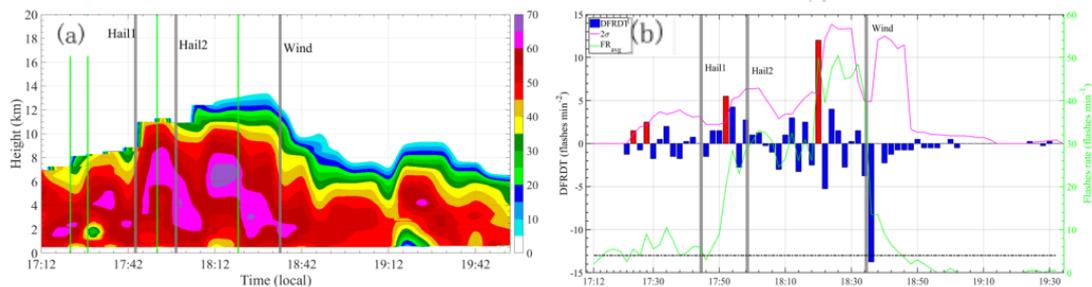


图8 2020年8月27日18:30北京房山X波段雷达(a)组合反射率因子,(b)沿图a中黑线的反射率因子剖面,
(c) Z_{DR} , (d) K_{DP} , (e) CC, (f)径向速度

Fig.8 X-Band Radar in Fangshan, Beijing at 18:30 BJT on August 27, 2020

(a) combined reflectivity factor,(b) the reflectivity section along the black line in (a), (c) Z_{DR} , (d) K_{DP} , (e) CC, (f) the radial velocity

在对影响房山地区的强雷暴单体的追踪结果中(图9a), 17:00—18:00雷暴有增强趋势, >60 dBz的反射率高度不断上升; 18:12左右, 最大反射率超过65 dBz, 雷暴高度约为6 km, 之后强雷暴中心明显下降; 18:34, 自动站监测到10级雷暴大风, 从强雷暴中心的下降时刻至雷暴大风发生, 有22 min提前量。对应的闪电跃增观测显示(图9b), 分别在17:24、17:28和17:52发生了三次跃增, 最早的跃增时刻相较于17:44大兴芦城出现冰雹(冰雹1, 直径均为0.8 cm), 提前了20 min; 较17:58房山良乡出现冰雹(冰雹2, 直径均为0.8 cm), 提前了34 min; 18:20出现的闪电跃增与18:34房山城关发生的10级雷暴大风相比, 提前了14 min。



注:图 a 中绿色实线代表闪电跃增时刻, 灰色实线代表冰雹 (Hail)、雷暴大风 (Wind) 发生时刻; 图 b 中红色柱状代表闪电跃增, 蓝色柱状代表非跃增, 绿色曲线表示闪电频数, 黑色点划线表示闪电频数阈值, 粉色曲线代表 2σ 值。

图 9 2020 年 8 月 27 日 17:12—20:00 房山追踪的强雷暴(a)沿雷暴中心的反射率因子剖面 (填色) 和(b)体内闪电跃增随时间的变化

Fig.9 Tracked strong thunderstorm during 17:12–20:00 BJT on August 27, 2020 in Fangshan, (a) profile of the tracked strong thunderstorm center (color-filled), (b) time series of lightning jumps within the thunderstorm cell

4 多源高频次探测资料的综合分析

4.1 雷暴初生阶段

在雷暴初生阶段 (16:00 前后), 环境场 0°C 层高度在 3.5 km 附近, -20°C 高度为 6.5 km; 低层水汽密度有明显增长 (图 4b), 温度垂直递减率达 $1.0^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, K 指数上升, SI 指数下降 (图 4d), 能量持续累积; 1 km 以下风向由偏东风转为东南风 (暖湿平流), 中层 (3~4 km) 维持偏北风, 0~3 km 垂直风切变增大 (图 5), 低层辐合增强, 并与地形共同作用触发了对流初生。北京延庆山区触发的孤立对流单体雷暴回波和微物理特征显示, 新生单体中心强度约为 40 dBz, 回波顶高约为 5 km (接近 -10°C 层高度), 表明上升气流尚未充分发展, 冰相粒子较少。

此阶段, 低层暖湿输送 (由微波辐射计观测)、垂直风切变增强 (由风廓线雷达观测) 与地形抬升共同作用促使孤立单体生成, 但冰相粒子不足 (雷达回波顶高偏低), 尚未达到强对流阈值。

4.2 雷暴发展阶段

雷暴进入成熟阶段 (16:25—17:42), K 指数达到峰值, SI 指数降至最低, 能量积累至最大。低层的东南风一直维持, 与雷暴中的下沉西北风形成强烈的低层辐合, 上升运动增强, 促进雷暴的进一步发展。回波强度由 40 dBz 增至 70 dBz (图 6b), 顶高升至 14 km (穿透

-20 °C 高度层)，回波强度垂直梯度陡增 ($>8 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$)，悬垂结构与弱回波区 (BWER) 明显，强回波 ($>60 \text{ dBz}$) 覆盖 3~9 km (0 °C 高度层到-20 °C 高度层)，符合冰雹生长区。该时段内，闪电频次发生了 4 次 2σ 跃增，首次跃增 (16:27) 超前冰雹落地 (17:19) 52 min，反映了强闪电活动。

能量积累 (由微波辐射计观测) 配合较强垂直风切变 (由风廓线雷达观测) 与悬垂回波 (S 波段雷达) 促使强雷暴维持，闪电跃增为冰雹预警提供关键信号。

4.3 雷暴消亡阶段

在雷暴消亡阶段 (17:42 之后)，整层湿度降低导致对流无法维持温度层结趋于稳定，同时垂直风切变减小，使得垂直运动进一步减弱，回波顶高逐渐降低，反射率因子垂直梯度减小，因此雷暴结构变得松散。此时，反射率因子的水平梯度也开始减小，上升气流减弱，造成云中冰相粒子无法维持，开始出现层状云降水，预示着雷暴即将消亡。

这一阶段，雷暴冷池扩散 (由风廓线雷达观测) 抑制了上升运动，层结稳定化 (由微波辐射计观测) 与冰相粒子耗尽 (S 波段雷达) 共同导致对流衰亡，从而闪电活动终止。多源高频次探测资料配合应用于整个雷暴的生命史过程，能对雷暴发展趋势预报提供了较好的参考作用 (图 10)。

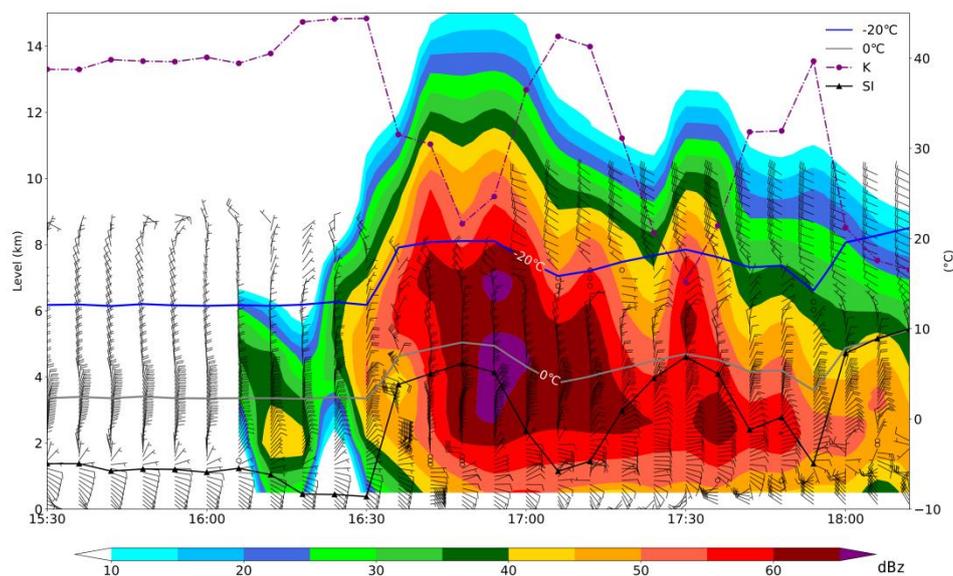


图 10 2020 年 8 月 27 日 15:30—18:10 沿延庆追踪的强雷暴中心的反射率因子剖面 (填色) 以及延庆风廓线雷达 (风羽) 和 K 指数和 SI 指数随时间的变化

Fig.10 Center profile of the tracked strong thunderstorm in Yanqing region from 15:30 to 18:10 on August 27, 2020, combined with time series plots of the K-index and SI-index calculated from Yanqing wind profiler (wind barbs) and microwave radiometer data

5 个例检验

本文选取 2020 年汛期其他 4 次局地强对流个例进一步验证上述结论。从高频次探测资料分析可见，微波辐射计在强对流发生前 30~120 min，气温、相对湿度、水汽密度出现波动变化，K 指数、SI 指数等能量表征指标也会在强对流天气发生前出现极值，为强对流天气发生前的环境变化分析提供了有效指示，并与 Lin et al (2023) 的研究结论一致。风廓线雷达数据显示，强对流天气发生前，垂直风切变存在脉动现象，且垂直风切变会突然增大，该现象较强对流天气发生有 55~120 min 的时间提前量；S 波段和 X 波段雷达可以有效判断雷暴所处的阶段，其雷暴质心的下降较强对流天气发生有 12~24min 的时间提前量；闪电跃增现象较强对流天气有 5~60 min 的时间提前量（表 3）。

表 3 2020 年北京 4 次局地强对流个例中多源高频次探测资料的应用效果

Table 3 Summary of application of multi-source high-frequency observations in 4 local severe convection cases in 2020 of Beijing

个例	天气背景	强对流类型	微波辐射计 温、湿度特征提前时 长/min	风廓线雷达 垂直风切变 增大提前时 长/min	S/X 波段雷达 质心下降提前 时长/min	闪电定位仪 跃增提前时 长/min
2020 年 6 月 18 日	冷涡、低压辐合区	短时强降水、雷暴大风	50	55	18	8~58
2020 年 6 月 25 日	高空冷涡及切变线	冰雹、雷暴大风、短时强降水	60~120	60	24	5~58
2020 年 7 月 6 日	低涡、切变线、低压辐合区	冰雹、短时强降水	30~120	90	24	5~55
2020 年 7 月 31 日	西风槽、切变线、地面辐合线	冰雹、短时强降水	90	120	12	20~60

6 结论与讨论

北京具备多源高频次探测资料，在局地强对流天气的监测中，这些资料的联合使用对判断对流的发生和发展具有较好的指示作用。通过对 2020 年 8 月 27 日北京一次局地强对流过程进行分析研究，结果表明：

- (1) 融合微波辐射计、风廓线雷达、S/X 波段雷达及三维闪电定位系统的高时空分辨率数据，可有效捕捉强对流天气的演变特征。微波辐射计反演的温度、湿度及稳定度参数（K 指数、SI 指数）在强对流发生前 30~120 min 出现显著变化，为环境能量积累提供了关键信

号；风廓线雷达监测的风转变、垂直风切变增强与低层暖平流可提前 55~120 min 指示动力抬升条件。

(2) S/X 波段雷达通过回波中反射率因子中质心高度的变化、速度场中高层辐散、低层辐合等特征，结合微波辐射计各层高度分布可以判断雷暴中上升速度加大，雷暴将发展加强。双偏振参数 (Z_{DR} 、 K_{DP}) 分析的雷暴微物理相态，对冰雹、雷暴大风的预警提前量可达 12~37 min；闪电跃增 (2σ 算法) 与强对流天气 (冰雹、大风、短时强降水) 的对应关系显著，预警提前量介于 5~60 min，其中首次闪电跃增对冰雹的指示性最优。

(3) 各种观测资料的综合应用可以综合判断雷暴生命史阶段的特征。地形抬升与低层暖湿平流触发孤立单体，微波辐射计能量参数累积 (K 指数上升、 SI 指数下降) 及风廓线垂直风切变脉动为初生阶段提供了早期预警信号。悬垂回波、强垂直梯度 ($>8 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$) 及闪电跃增反映强闪电活动，结合冰相粒子生长区 (0°C 层高度和 -20°C 层高度) 的回波特征，可提前 52 min 预警冰雹，其是判断雷暴发展阶段重要的参考。冷池扩散、层结稳定化 (微波辐射计湿度下降) 及冰相粒子耗尽 (雷达回波松散) 共同导致对流减弱，闪电活动终止指示雷暴消亡阶段。

(4) 2020 年北京其他 4 次强对流个例分析表明，多源高频次探测资料的协同应用具有较好的普适性。微波辐射计和风廓线雷达的环境参数变化、雷达质心下降特征及闪电跃增信号在不同天气背景下均表现出稳定的预警能力。

表 4 多源高频次探测资料在北京强对流天气过程中的临近预报预警提前量

Table 4 the forecast and warning lead time of multi-source high-frequency detection data

资料种类	关注物理量	强对流天气发生提前时长/min
微波辐射计	温度、相对湿度和水汽密度	30~120

风廓线雷达	0~3 km 垂直风切变	5~120
S 和 X 波段雷达	强雷暴中心反射率因子强度	12~54
闪电定位系统	总闪频数	5~69

本文定量分析了多源高频次探测资料在一次强对流天气中的临近预报和预警提前量, 结果为业务应用提供了一定的指示意义。然而, 由于微波辐射计和风廓线雷达的探测原理存在一定的限制, 在降水或者强对流天气发生时, 这些仪器的观测数据可能会受到较大污染, 导致数据质量受到影响而无法直接使用。因此, 在实际应用中, 应重点分析降水或强对流天气发生前观测要素的时序变化, 避免使用降水发生阶段的数据。此外, 针对局地突发的强对流天气的临近预报与预警, 虽然多源高频次探测资料提供了重要的预警信息, 但在量化分析和应用方面仍然存在较大挑战。随着观测资料的不断积累, 未来需要持续开展大量个例预报指标的量化研究, 进一步提升业务应用的精确度和可靠性。

致谢:感谢北京城市研究院李思腾所做的雷达资料质量计算分析工作。

参考文献

- 曹伟华, 陈明轩, 高峰, 等, 2019. 雷暴区域追踪矢量与雷暴单体追踪矢量融合临近预报研究[J]. 气象学报, 77(6): 1015-1027. Cao W H, Chen M X, Gao F, et al, 2019. A vector blending study based on object-based tracking vectors and cross correlation tracking vectors[J]. Acta Meteor Sin, 77(6): 1015-1027 (in Chinese).
- 邓闯, 阮征, 魏鸣, 等, 2012. 风廓线雷达测风精度评估[J]. 应用气象学报, 23(5): 523-533. Deng C, Ruan Z, Wei M, et al, 2012. The evaluation of wind measurement accuracy by wind profile radar[J]. J Appl Meteor Sci, 23(5): 523-533 (in Chinese).
- 翟亮, 王令, 刘文军, 2012. 两次降雪天气过程预报中边界层风廓线雷达资料的应用[J]. 气象科技, 40(5): 783-788. Zhai L, Wang L, Liu W J, 2012. Application of boundary layer wind-profiler

- radar data to forecasting of two snowy weather events[J]. Meteor Sci Technol, 40(5): 783-788 (in Chinese).
- 董保举, 付志嘉, 李明, 等, 2012. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用[J]. 气象科技, 40(1): 74-78, 86. Dong B J, Fu Z J, Li M, et al, 2012. Feature analysis of a rain storm with wind profile radar data[J]. Meteor Sci Technol, 40(1): 74-78, 86 (in Chinese).
- 董丽萍, 吴蕾, 王令, 等, 2014. 风廓线雷达组网资料初步对比分析[J]. 气象, 40(9): 1145-1151. Dong L P, Wu L, Wang L, et al, 2014. Preliminary comparison research of the wind profile radar network data[J]. Meteor Mon, 40(9): 1145-1151 (in Chinese).
- 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等, 2008. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用[J]. 气象科技, 36(3): 300-304. Gu H P, Ma S Q, Wang Y C, et al, 2008. Application of airda-3000 boundary wind profile radar in analyzing summer heavy rainfall in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 36(3): 300-304 (in Chinese).
- 何娜, 孙继松, 王国荣, 等, 2014. 北京地区预报失误的两次降雪过程分析[J]. 气象科技, 42(3): 488-495. He N, Sun J S, Wang G R, et al, 2014. Analysis of unsuccessful forecasting for two snowfall processes in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 42(3): 488-495 (in Chinese).
- 李聪, 姜有山, 姜迪, 等, 2017. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象, 43(9): 1084-1094. Li C, Jiang Y S, Jiang D, et al, 2017. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 43(9): 1084-1094 (in Chinese).
- 李建强, 李新生, 董文晓, 等, 2017. RPG-HATPRO 微波辐射计反演的温度和湿度数据适用性分析[J]. 气象与环境学报, 33(6): 89-95. Li J Q, Li X S, Dong W X, et al, 2017. Applicability analysis of air temperature and humidity data retrieved from a RPG-HATPRO microwave radiometer[J]. J Meteor Environ, 33(6): 89-95 (in Chinese).
- 李妙英, 胡明宝, 陈楠, 等, 2013. 风廓线雷达资料在一次强降水天气过程中的分析应用[J]. 成都信息工程学院学报, 28(1): 24-28. Li M Y, Hu M B, Chen N, et al, 2013. An analysis of application in a heavy rain by using wind profiler data[J]. J Chengdu Univ Inform Technol, 28(1): 24-28 (in Chinese).
- 孙继松, 石增云, 王令, 2006. 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究[J]. 气候与环境研究, 11(1): 76-84. Sun J S, Shi Z Y, Wang L, 2006. A study on topography impacting on distribution of hail events[J]. Climatic Environ Res, 11(1): 76-84 (in Chinese).
- 孙艳桥, 汤达章, 桑建人, 等, 2019. RPG_HATPRO_G4 型地基微波辐射计温度数据质量控制方法与效果分析[J]. 干旱区地理, 42(6): 1282-1290. Sun Y J, TANG D Z, SANG J R, et al, 2019. Quality control method and efficiency analysis on temperature data by RPG-HATPRO-G4 type

- ground-based microwave radiometer[J]. *Arid Land Geogr*, 42(6): 1282-1290 (in Chinese).
- 田野, 刘旭林, 于永涛, 等, 2022. 北京城区大气边界层高度的反演研究[J]. *气象科技*, 50(1): 9-20.
Tian Y, Liu X L, Yu Y T, et al, 2022. Inversion of atmospheric boundary layer height in Beijing urban area[J]. *Meteor Sci Technol*, 50(1): 9-20 (in Chinese).
- 田野, 姚雯, 尹佳莉, 等, 2021. 不同闪电跃增算法在北京地区应用效果对比[J]. *应用气象学报*, 32(2): 217-232. Tian Y, Yao W, Yin J L, et al, 2021. Comparison of the performance of different lightning jump algorithms in Beijing[J]. *J Appl Meteor Sci*, 32(2): 217-232 (in Chinese).
- 王辉, 李林, 郑国锋, 等, 2019. X波段天气雷达电磁辐射对环境影响的评估[J]. *气象*, 45(5): 723-729.
Wang H, Li L, Zheng G F, et al, 2019. Assessment of impacts of X-band weather radar electromagnetic radiation on environment[J]. *Meteor Mon*, 45(5): 723-729 (in Chinese).
- 汪学渊, 阮征, 李效东, 等, 2016. 雨滴谱仪与风廓线雷达反射率对比试验[J]. *气象*, 42(1): 107-114.
Wang X Y, Ruan Z, Li X D, et al, 2016. Comparison of the reflectivities of wind profile radar and raindrop disdrometer[J]. *Meteor Mon*, 42(1): 107-114 (in Chinese).
- 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等, 2011. 用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析[J]. *气候与环境研究*, 16(6): 697-706. Wei D, Sun J S, Lei L, et al, 2011. Reliability analysis of quantitative applications of sounding constructed from data detected by microwave radiometer and wind profiler[J]. *Climatic Environ Res*, 16(6): 697-706 (in Chinese).
- 吴翀, 刘黎平, 仰美霖, 等, 2021. X波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术[J]. *应用气象学报*, 32(2): 200-216. Wu C, Liu L P, Yang M L, et al, 2021. Key technologies of hydrometeor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar[J]. *J Appl Meteor Sci*, 32(2): 200-216 (in Chinese).
- 姚静, 2012. 风廓线雷达资料在一次短时强降水中的应用[J]. *安徽农业科学*, 40(29): 14407-14410. Yao J, 2012. Use of wind profiling radar data in heavy precipitation forecast of Xi'an[J]. *J Anhui Agric Sci*, 40(29): 14407-14410 (in Chinese).
- 叶飞, 梁海河, 文浩, 等, 2020. 新一代天气雷达均一性评估[J]. *气象科技*, 48(3): 322-330. Ye F, Liang H H, Wen H, et al, 2020. Evaluation of homogeneity of new generation weather radar[J]. *Meteor Sci Technol*, 48(3): 322-330 (in Chinese).
- 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. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. *Meteor Mon*, 38(11): 1313-1329 (in Chinese).
- 曾瑾瑜, 夏丽花, 陈文键, 2014. 福建省风廓线雷达资料在一次强对流天气过程中的应用[J]. *气象与环境科学*, 37(3): 40-48. Zeng J Y, Xia L H, Chen W J, 2014. Wind profiler radar data application

- of a strong convective weather process in Fujian[J]. *Meteor Environ Sci*, 37(3): 40-48 (in Chinese).
- 郑栋, 张义军, 孟青, 等, 2010. 北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系[J]. *应用气象学报*, 21(3): 287-297. Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al, 2010. Relationship between lightning activities and surface precipitation in thunderstorm weather in Beijing[J]. *J Appl Meteor Sci*, 21(3): 287-297 (in Chinese).
- 郑石, 黄兴友, 李艳芳, 2011. 一次短时暴雨 WP-3000 边界层风廓线雷达回波分析[J]. *气象与环境学报*, 27(3): 6-11. Zheng S, Huang X Y, Li Y F, 2011. Analysis of echo characteristics of WP-3000 boundary wind profile radar from a short period heavy rain[J]. *J Meteor Environ*, 27(3): 6-11 (in Chinese).
- 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等, 2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. *应用气象学报*, 26(6): 641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. *J Appl Meteor Sci*, 26(6): 641-657 (in Chinese).
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. *气象*, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. *Meteor Mon*, 43(6): 641-652 (in Chinese).
- 邹德龙, 梁晓京, 岑易峰, 等, 2019. 基于风廓线雷达资料的一次强降水天气过程分析[J]. *气象应用与研究*. 40(3): 26-30. Zou D L, Liang X J, Cen Y F, et al, 2019. Analysis of a heavy rainfall weather process based on wind profiler radar data[J]. *J Meteor Res Appl*, 40(3): 26-30 (in Chinese).
- Bringi V N, Chandrasekar V, 2010. 偏振多普勒天气雷达原理和应用[M]. 李忱, 张越, 译. 北京: 气象出版社. Bringi V N, Chandrasekar V, 2010. *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*[M]. Li C, Zhang Y, trans. Beijing: Meteorological Press (in Chinese).
- Browning K A, Blyth A M, Clark P A, et al, 2007. The convective storm initiation project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(12): 1939-1956.
- Chan P W, 2009. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. *Meteor Z*, 18(3): 253-265.
- Dixon M, Wiener G, 1993. TITAN: thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a radar-based methodology[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 10(6): 785-797.
- Gatlin P N, 2008. Severe weather precursors in the lightning activity of Tennessee valley thunderstorms[D]. Tuscaloosa: University of Alabama.

- Lin X M, Chen H, Zhang N, et al, 2023. Tracking the convection potential based on a foundation remote sensing air sounding profile system[J]. *Atmosphere*, 14(7): 1117.
- Schultz C J, Carey L D, Schultz E V, et al, 2017. Kinematic and microphysical significance of lightning jumps versus non-jump increases in total flash rate[J]. *Wea Forecasting*, 32(1): 275-288.
- Seliga T A, Bringi V N, 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 15(1): 69-76.
- Tian Y, Qie X S, Sun Y, et al, 2019. Total lightning signatures of thunderstorms and lightning jumps in hailfall nowcasting in the Beijing area[J]. *Atmos Res*, 230: 104646.
- Wakimoto R M, Murphey H V, 2010. Analysis of convergence boundaries observed during IHOP_2002[J]. *Mon Wea Rev*, 138(7): 2737-2760.
- Wang Q W, Xue M, 2012. Convective initiation on 19 June 2002 during IHOP: high-resolution simulations and analysis of the mesoscale structures and convection initiation[J]. *J Geophys Res Atmos*, 117(D12): D12107.
- Weckwerth T M, Murphey H V, Flamant C, et al, 2008. An observational study of convection initiation on 12 June 2002 during IHOP_2002[J]. *Mon Wea Rev*, 136(7): 2283-2304.
- Weckwerth T M, Parsons D B, 2006. A review of convection initiation and motivation for IHOP_2002[J]. *Mon Wea Rev*, 134(1): 5-22.
- Weckwerth T M, Parsons D B, Koch S E, et al, 2004. (IHOP_2002) and some preliminary highlights[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 85(2): 253-278.
- Wilson J W, Roberts R D, 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observational and modeling perspective[J]. *Mon Wea Rev*, 134(1): 23-47.
- Xue M, Martin W J, 2006a. A high-resolution modeling study of the 24 May 2002 dryline case during IHOP. Part I: numerical simulation and general evolution of the dryline and convection[J]. *Mon Wea Rev*, 134(1): 149-171.
- Xue M, Martin W J, 2006b. A high-resolution modeling study of the 24 May 2002 dryline case during IHOP. Part II: horizontal convective rolls and convective initiation[J]. *Mon Wea Rev*, 134(1): 172-191.