

杜沛珩, 史辰. 首都机场 2021 年 8 月 9 日超级单体天气过程分析[J]. 陕西气象, 2025(1): 7-12.

文章编号: 1006-4354(2025)01-0007-06

首都机场 2021 年 8 月 9 日超级单体天气过程分析

杜沛珩¹, 史辰²

(1. 民航华北空管局气象中心, 北京 100621; 2. 北京市海淀区气象局, 北京 100080)

摘要: 利用第五代欧洲中期天气预报中心再分析资料(ERA5)、地面观测资料、探空资料以及北京首都机场多普勒雷达资料等对 2021 年 8 月 9 日首都机场超级单体造成的强对流天气过程进行分析, 结果发现: (1) 此次超级单体过程发生在东北冷涡后部的西北气流中, 高空冷平流叠加在低层暖湿气流上, 形成“上干冷下暖湿”的“喇叭口”配置, 大气对流不稳定性强, 为超级单体的发生发展提供了有利的环境条件; (2) 北京城区近地面东南风的维持与西山雷暴后部下沉冷池在城区辐合交汇产生新的上升气流, 使得雷暴下山增强; (3) 从雷达径向速度图中观察到持久深厚的中气旋, 证明此次下山增强的过程为超级单体风暴; (4) 从雷达 PPI 图上观测到超级单体存在后侧“V”型缺口, 表明超级单体中会产生冰雹和雷暴大风等灾害性天气, 识别超级单体中的特征回波对由超级单体引起的冰雹和雷暴大风等灾害天气预报有一定的指示意义。

关键词: 雷暴大风; 中气旋; 超级单体

中图分类号: P458.3

文献标识码: A

雷暴天气作为灾害性天气, 一直以来都是影响民航飞行安全和效率的重要天气现象, 备受国内外学者和从业人员的关注。雷暴的发展, 需要满足三个基本条件, 即充足的水汽、不稳定层结和触发对流的抬升机制^[1]。影响雷暴生成和发展主要有天气尺度天气系统、中尺度天气系统和小尺度天气系统, 中尺度天气系统对于雷暴发展最为直接^[2], 如果有小尺度系统配合, 雷暴的发展将会更加旺盛。超级单体不仅会产生冰雹, 还会导致龙卷、雷暴大风、强降水等天气的出现。经典的超级单体经常是相对孤立的, 中气旋是超级单体重要特征^[3]。近年来国内许多学者对超级单体带来的风雹天气做了较为深入的研究^[4-7]。郑媛媛等^[8]对我国超级单体风暴结构和与之伴随出现的中气旋的特征进行了详细论述; 黄继雄等^[9]对 2018 年 6 月 26 日及 2018 年 7 月 4 日首都机场两次西北向超级单体风暴下山过程进行了对比分析, 发现首都机场西北侧 50~100 km 区域是夏

季首都机场雷暴发展的重要区域, 雷暴下山增强也是首都机场出现冰雹的重要原因。合适的 0℃层与 -20℃层高度, 有利于冰雹、雷暴大风和短时强降水天气的形成^[10]。陈双等^[11]对 2009 年 7 月 22 日一次雷暴下山增强过程进行研究, 发现组织完好的雷暴到达平原地区后, 偏南暖湿气流与雷暴下沉气流的相互作用是雷暴在平原地区再次增强的主要原因。程月星等^[12]对北京下山雷暴增强机制进行了研究, 发现雷暴下山后形成的冷池出流会强迫平原地区暖空气抬升从而使风暴加强和维持。梁爱民等^[13]对首都机场地区雷暴大风进行分类后发现, 大气可降水量较低时有利于雷暴大风的出现。黄梦妮等^[14]利用怀化站雷达回波产品发现, 当强对流单体中存在中等强度的中气旋, 且 VIL 值长时间维持在 55 kg/m² 以上时, 有利于大冰雹的产生。

2021 年 8 月 9 日, 首都机场附近出现了一次超级单体天气过程, 此次过程出现了 8 级以上大

收稿日期: 2024-03-01

作者简介: 杜沛珩(1990—), 男, 汉族, 陕西榆林人, 硕士, 工程师, 主要从事强对流天气分析与研究。

风和 7 mm 左右的冰雹,对首都机场航班造成严重影响,多架次航班被迫延误或取消,对旅客正常出行造成很多不便,同时对机场地区的建筑以及飞机机体造成了不同程度的损伤。分析发现此次过程是雷暴下山后增强,在首都机场西北部发展为超级单体引发的。通常北京地区出现的超级单体多发展于西北部山区,且雷暴云团下山后多为减弱,但此次过程在下山后增强为超级单体较为少见,因而具有一定的研究意义。

1 北京地区地形、地貌及天气特征

首都机场东北、北、西三面环山。北部和东北部的山区为军都山,也被称作“北山”。军都山西自高崖口附近,向东绵延至昌平、延庆、怀柔 and 密云四区境内,主要由镶嵌着若干山间盆地的断块山组成。西部山区,属太行山的余脉,也被称作“西山”,分布在门头沟区、海淀区和房山区境内,由一系列东北—西南向岭谷相间排列的褶皱山组成。首都机场距北部山区最近 22 km 左右,其西部距西山 35 km 左右。首都机场西部及北部山区平均海拔 1.0~1.5 km。由于这种西高东低、北高南低的特殊地形,常有对流风暴在西北部或东北部山区生成,受高空引导气流影响向东南或西南传播。在平原地区大气热力不稳定或动力辐合的有利条件下,风暴能顺利传播至山下平原地区并增强,带来局地暴雨、短时大风、冰雹等灾害性强对流天气。但有时对流风暴常常在山区“徘徊”,不能及时增强并传播至平原地区,甚至风暴

在下山前衰减并迅速消亡^[15]。因此,雷暴下山后的变化趋势一直是首都机场短临预报的重点和难点。

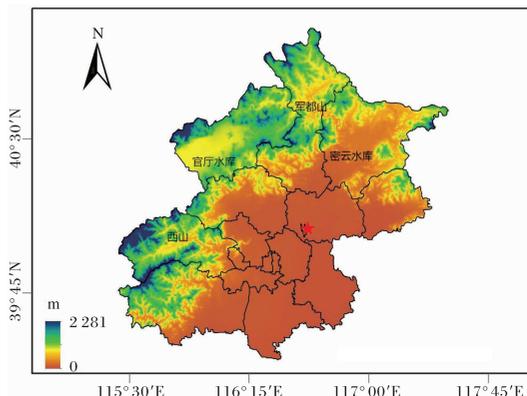


图1 北京地理特征图(红色五角星为首都机场位置;审图号为 GS(2019)3082 号)

2 过程简述及环流背景

2021 年 8 月 9 日,北京首都机场下午至前半夜出现了大范围长时间的雷雨天气(降水时段为 17:58—21:16),期间机场出现 32.7 mm 的短时强降水、8~11 级的雷暴大风和直径为 5~7 mm 的冰雹。图 2a 为华北区域 8 月 9 日 14 时 500 hPa 位势高度、温度、涡度场,可以看出副热带高压位于江南流域,北京地区位于宽广槽区内,温度槽落后于高度槽,有利于高空槽东移加深,北京上空存在冷平流。在同时次 850 hPa 形势场(图 2b)上,北京地区受暖脊控制且 500 hPa 与 850 hPa 的温差为 28 ℃,温度直减率大,有利于对流发展。

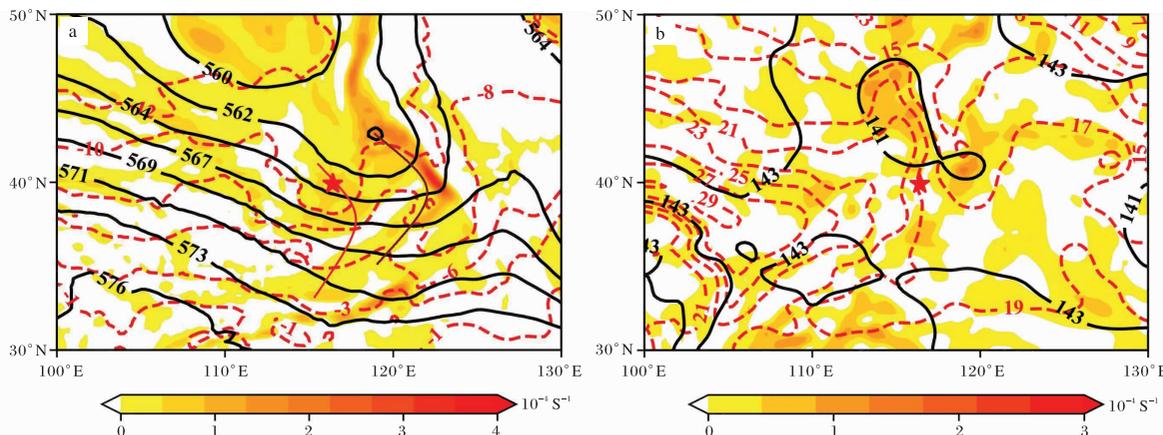


图 2 2021-08-09T14 位势高度、温度、涡度场(a 500 hPa,b 850 hPa;黑色实线为位势高度线,单位为 dagpm;红色虚线为等温线,单位为 ℃;红色五角星位置代表北京所处位置)(图 1a 中棕色实线为 500 hPa 高度槽线;红色实线为 500 hPa 温度槽线)

图 3 为北京地区极大风图,从图 3a 可以看出,16:00—16:30 首都机场北侧有一条地面辐合线,且持续时间较长,当日北京城区盛行偏南风,风速维持在 4~6 m/s,与雷暴云的移动方向相反,偏南风长时间维持西北部山前被迫形成地形抬升。从图 3b 发现,17:00—17:30,当雷暴下山时,首都机场西北侧出现 16~18 m/s 的极大风,与受地形抬升的偏南风交汇,影响雷暴云继续加

强发展并向东南方向移动,同时地面辐合线位置移至首都机场以南。从图 3c 发现,雷暴云下山后,地面辐合线继续向南移动,与雷暴云的移动方向一致,近地面偏南风持续维持,雷暴云的生命周期进一步延长,并在城区暖湿环境下激发对流,首都机场出现雷暴大风和冰雹天气。

3 探空资料分析

图 4a 为 9 日 08 时北京站温度对数压力图。可以看出:(1)层结曲线与状态曲线之间红色区域面积较大,对流有效位能较强,CAPE 值为 1192.4 J/kg;(2)700 hPa~400 hPa 存在明显干区,同时 700 hPa 以下有湿区,850 hPa 湿度趋近于饱和,“上干冷,下暖湿”的喇叭口特征明显,中层干大气的夹卷作用,有利于雷暴云中水滴蒸发吸热,冷池增强,有利于雷暴大风的形成;(3)中低层风速随高度升高明显增加,风向随高度升高呈顺时针旋转,垂直风切变大,0~6 km 的垂直风切约 16 m/s,达到中等偏强程度,0~3 km 的垂直风切约 10 m/s,垂直风切变较强,有利于对流的组织化发展;(4)0~-20 °C 层在 600~400 hPa 之间,0 °C 层高度在 4 km 左右,层结条件有利于冰雹的产生。利用 9 日下午 15 时首都机场的温度、气压以及露点对 08 时的温度对数压力图进行订正,结果如图 4b 所示,层结曲线与状态曲线之间的红色区域面积相较于图 4a 中有明显增大,CAPE 值高达 2 898.9 J/kg,与图 4a 对比,CAPE 值增量明显,同时由于湿层较薄,容易产生雷暴大风。

4 雷达回波特点

中气旋被认为是超级单体风暴在径向速度图中的特征回波。在首都机场雷达 7.2°仰角径向速度图(图 5a)上发现,在 17:52 距离雷达方向 30 km 范围内出现一组速度对(黑色圆圈内),旋转速度约为 22~26 m/s,从图 5b—5d 中发现,连续四个体扫速度对速度基本维持在 22 m/s 左右且呈现明显的气旋旋转,该中气旋的强度为中等以上,由于该雷暴云中存在着中气旋,且持续时间较长,所以该雷暴云为超级单体。

图 6 为首都机场 1.5°仰角反射率因子,选取雷暴云在下山过程中的三张体扫图可以发现,当超级单体下山进入平原后,超级单体范围增大,基

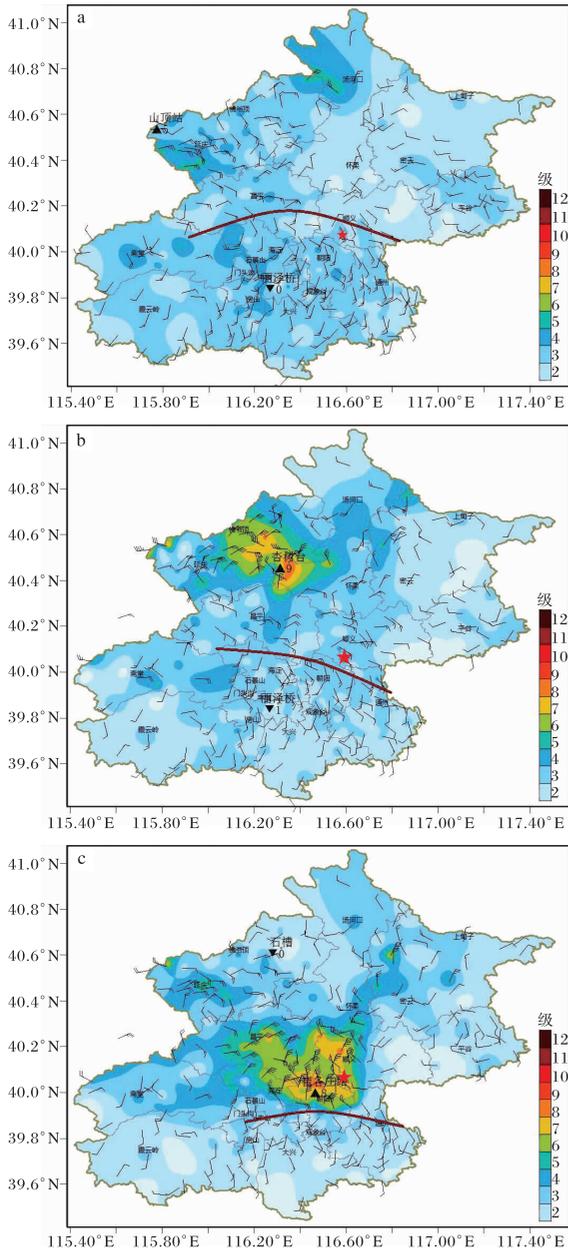


图 3 2021-08-09 北京市极大风图(a 16:00—16:30; b 17:00—17:30; c 18:00—18:30)(审图号为 GS(2019) 3082 号)

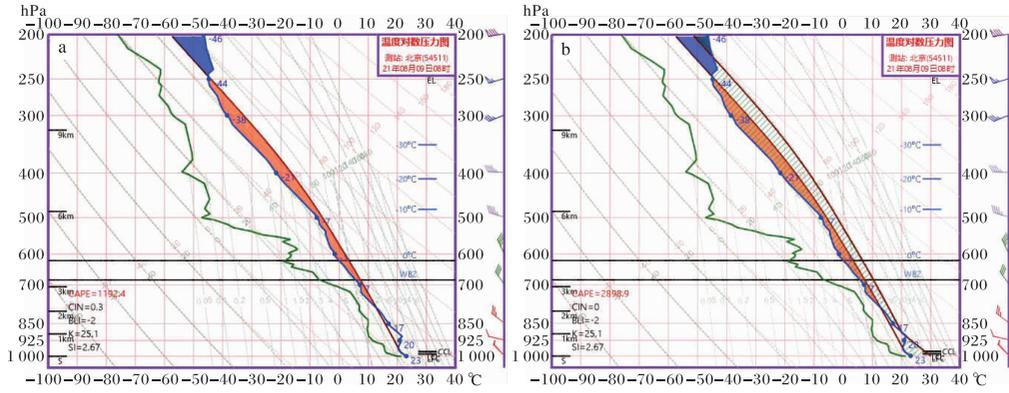


图4 2021-08-09T08北京站温度对数压力图(a 订正前;b 订正后)

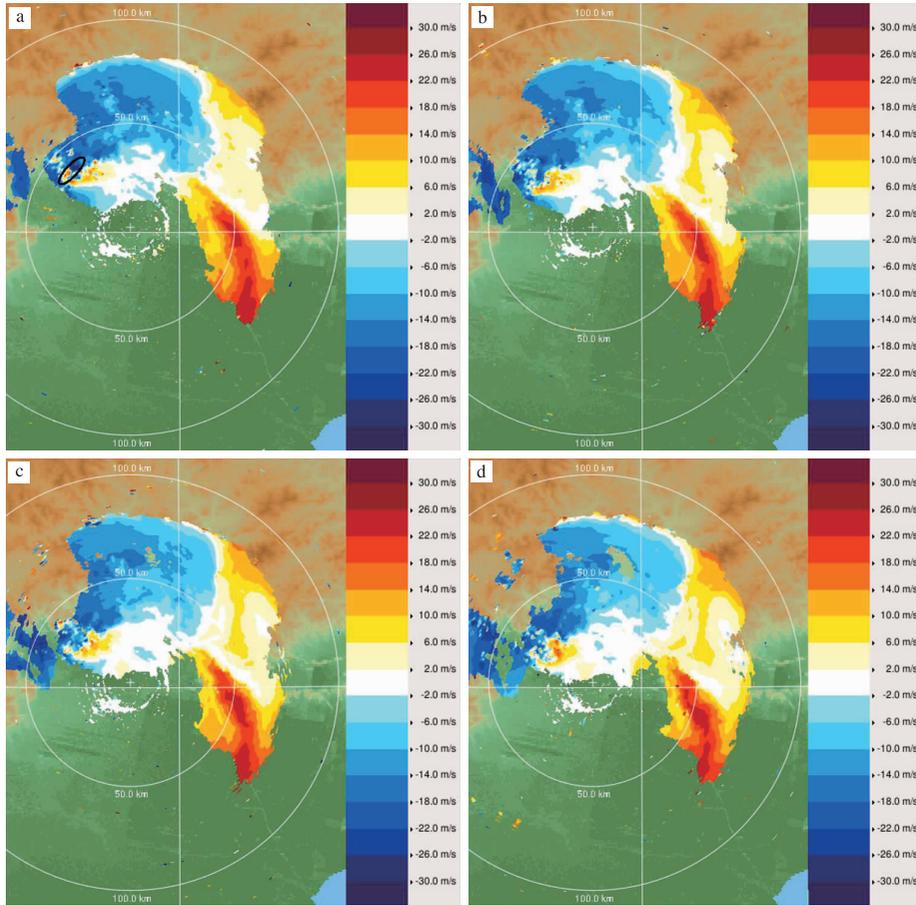


图5 2021-08-09首都机场7.2°仰角径向速度图(a 17:52;b 17:57;c 18:02;d 18:08)

本反射率一直维持在 55 dBZ 左右,雷暴下山后受地面辐合线影响,强度维持。在超级单体下山前,超级单体后侧 V 型缺口(图 6a 中红圈中的结构)指向的强回波区内存在冰雹,同时 V 型缺口的出现也表明该超级单体后侧存在强下沉气流,强下沉气流会增强地面冷池。图 6c 中红圈所标注的 V 型缺口在雷暴单体下山后依然存在,增强的冷

池引起北京平原地区的雷暴大风,同时平原地区的偏南气流将沿冷池向上抬升延长了超级单体的生命周期。

图 7 为雷达组合反射率图,从图 7a 中发现,超级单体的云顶高度超过 12 km,单体中心最强回波大于 55 dBZ,此时对图 7a 进行剖面分析发现,回波最大值区的高度在 6~8 km,且回波大值

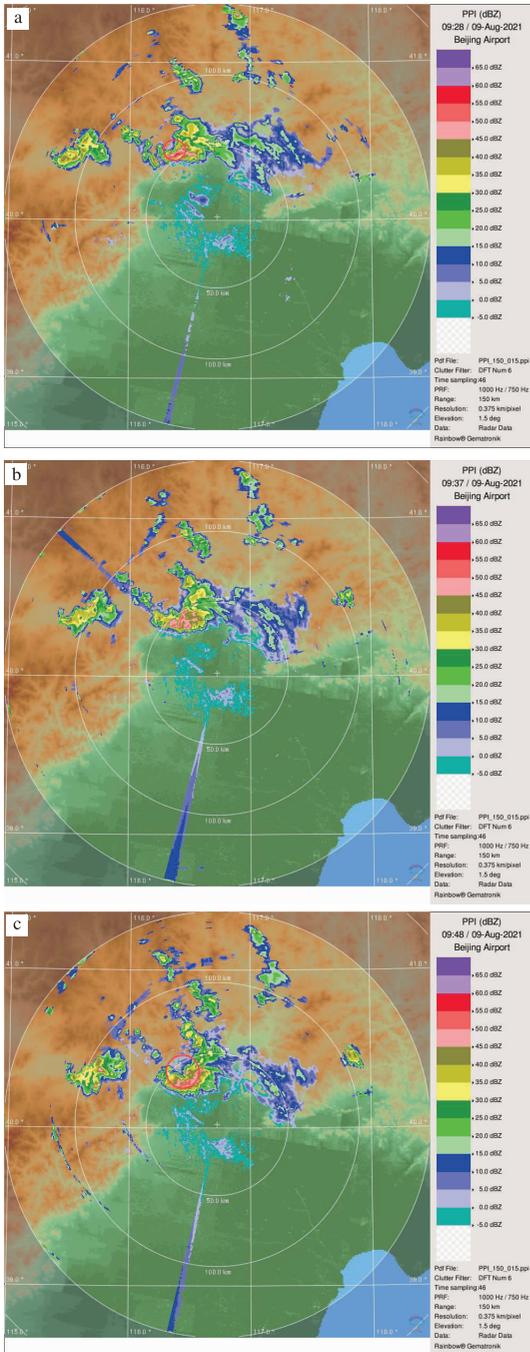


图 6 2021-08-09 首都机场 1.5° 仰角反射率因子
(a 17:28; b 17:37; c 17:48)

区位置相对集中,回波墙呈垂直状且未接地,超级单体核心部分结构紧实,同时存在弱回波区,表明此时超级单体内冰雹或大雨滴并未落地,超级单体仍处于发展阶段。结合当日各层温度来看,风暴核心高度所在的温度层基本处于 $(-10 \sim -20)^{\circ}\text{C}$ 之间,有利于冰雹的形成。在图 7b 中,强回波核高度由 $6 \sim 8 \text{ km}$ 下降到 $4 \sim 6 \text{ km}$,回波墙

接地,超级单体核心部分结构范围逐渐变大,表明超级单体内部的冰雹、大雨滴等大粒子落地形成强降水或冰雹。

5 小结

对 2021 年 8 月 9 日北京地区的超级单体引发的冰雹天气过程进行了深入分析,得出以下结论。

(1)此次超级单体天气过程发生在东北冷涡后部西北气流中,冷涡后部冷平流叠加在低层暖湿气流上, 850 hPa 和 500 hPa 的温差达 28°C ,上干冷下暖湿的层结配置使得大气对流不稳定增强,为强对流的发生发展提供了有利的环境条件;近地面层北京城区偏南风的维持与西山雷暴后部下沉冷池在城区辐合交汇是雷暴下山增强的重要条件。

(2)强中气旋的维持和发展为超级单体的识别提供了直接依据。

(3)在雷达上观测到超级单体后侧 V 型缺口,表明超级单体后侧强下沉气流会导致地面出现强风,对雷暴大风预报有一定的指示意义。

(4)此次雷暴云发展为超级单体出现的位置距离首都机场较近,同时下山增强约 $40 \sim 50 \text{ min}$ 后影响首都机场,因此预报提前量较小,预报比较困难,后续应加强此类过程的统计分析。

参考文献:

- [1] 寿绍文,厉申申,姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社,2003:324-326.
- [2] 俞樟孝,俞连根,丛黎强,等. 浙江大范围强对流天气过程中的中尺度(α)低压[J]. 气象学报,1990,48(4):500-505.
- [3] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,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] 孙晓磊,王科,左涛,等. 引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析[J]. 暴雨灾害,2023,42(3):312-323.
- [5] 吴海英,孙继松,慕瑞琪,等. 一次强对流过程中两种不同类型风暴导致的极端对流大风分析[J]. 气象学报,2023,81(2):205-217.
- [6] 许长义,章丽娜,肖现,等. 冷涡背景下华北平原一次弓形回波致灾大风过程分析[J]. 气象学报,2023,81(1):40-57.

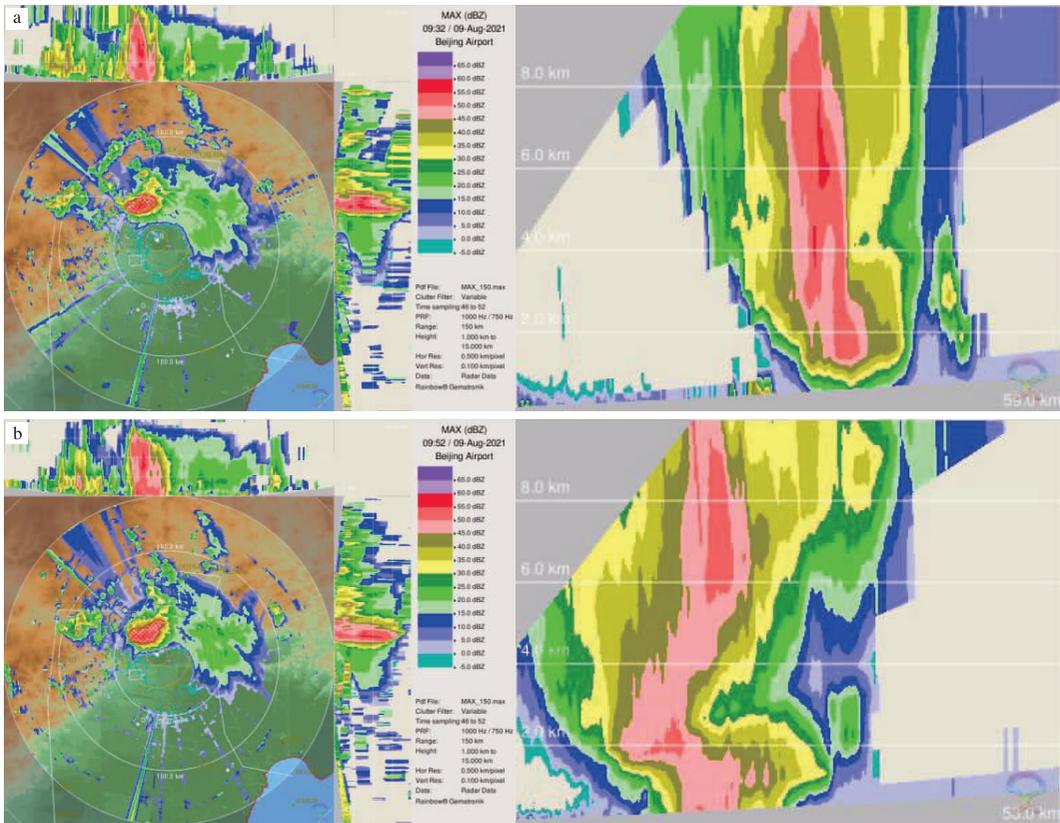


图7 2021-08-09 首都机场雷达组合反射率及其径向垂直剖面图(a 17:32;b 17:52)

- [7] 刘嘉慧敏,郑然,梁绵,等. 2018年陕西商洛一次罕见强雹暴环境条件及雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2020(2):1-11.
- [8] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 2004, 62(3):317-328.
- [9] 黄继雄,傅灵艳,谭杰丽. 首都机场西北向雷暴下山增强减弱的关键区研究[J]. 民航学报, 2022, 6(6): 69-73.
- [10] 易文军,石兴琼,何炳文,等. 湘西北一次强冰雹天气雷达回波特征分析[J]. 陕西气象, 2021(4):16-21.
- [11] 陈双,王迎春,张文龙,等. 复杂地形下雷暴增强过
- 程的个例研究[J]. 气象, 2011, 37(7):802-813.
- [12] 程月星,孙继松,戴高菊,等. 2016年北京地区一次雷暴大风的观测研究[J]. 气象, 2018, 44(12): 1529-1541.
- [13] 梁爱民,张庆红,申红喜,等. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象, 2006, 32(11):73-80.
- [14] 黄梦妮,崔健榕,张昆,等. 一次长生命史超级单体降雹天气诊断分析[J]. 陕西气象, 2023(2):14-20.
- [15] 肖现,陈明轩,高峰,等. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J]. 大气科学, 2015, 39(1):100-124.