

杨璐, 陈明轩, 孟金平, 等, 2018. 北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达统计特征及预警提前量分析[J]. 气象, 44(6): 802-813.

北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达 统计特征及预警提前量分析*

杨 璐¹ 陈明轩¹ 孟金平² 陈学玲³ 王子静³ 赵 晨³

1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

2 北京市气象局, 北京 100089

3 北京市大兴区气象局, 北京 102600

提 要: 选取 2010—2014 年发生在北京地区的 19 个致灾的雷暴大风天气过程, 应用北京新一代多普勒天气雷达体扫资料的反射率因子和径向速度产品, 分析了雷暴大风天气不同生命期内的雷达回波特征。分析发现依据径向速度大值区能对 77.8% 的带状回波造成的雷暴大风天气提前发布预警, 能对 100% 的弓形回波造成的雷暴大风天气提前发布预警, 而其中有 67% 可提前 30 min 发布预警; 孤立的块状回波前侧均未观测到阵风锋回波, 径向速度图未观测到入流急流, 径向速度大值区不明显。但径向速度图上观测到的中层径向辐合、入流急流、中气旋及反射率图上观测到的阵风锋都为雷暴大风的提前预警提供了重要指示特征。

关键词: 雷暴大风, 雷达回波特征, 预警提前量

中图分类号: P446

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.008

Radar Statistical Characteristics and Warning Lead Analysis of Thunderstorm Gales in Different Life Periods in Beijing

YANG Lu¹ CHEN Mingxuan¹ MENG Jinping² CHEN Xueling³ WANG Zijing³ ZHAO Chen³

1 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

2 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089

3 Daxing Meteorological Office of Beijing, Beijing 102600

Abstract: Using Beijing CINRAD-SA Radar reflectivity and radial velocity products about 19 cases of thunderstorm from 2010 to 2014, radar echo characteristics of thunderstorm gales in different life periods in Beijing are analyzed. It is found that 77.8% and 100% thunderstorm gales caused by the belt-shaped and bow radar echo can be respectively forecasted and warned early, and 67% of them can be issued early warning in 30 min lead time. No gust front echo was observed in the front of the isolated block echo, the inflow jet was not seen in the radial velocity map, and the radial velocity was not obvious. However, the middle radial convergence, the inflow jet and the gust front observed on the radial velocity map provide important indicative features for the early warning of thunderstorm gale.

Key words: thunderstorm gales, radar echo characteristics, warning lead

* 国家自然科学基金青年基金项目(41705091)、北京自然科学基金项目(8164056)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(IU-MKY201706)共同资助

2017 年 7 月 25 日收稿; 2017 年 10 月 12 日收修定稿

第一作者: 杨璐, 主要从事短时临近资料分析与应用研究. Email: lyang@ium.cn

引言

雷暴大风是指雷暴与大风相伴出现的天气现象,雷暴大风中大风的标准规定为:雷暴发生前或发生时伴随平均风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,或瞬时风速(阵风) $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。俞小鼎等(2006)指出雷暴大风的产生主要有三种方式:一是对流风暴中的下沉气流到达地面时产生辐散,直接造成地面大风,除了下沉气流外,移动雷暴的高空水平动量下传也是重要原因;二是对流风暴中的下沉气流到达地面时,由于蒸发冷却形成冷空气堆,向四面扩散,冷堆与周围暖湿气流之间形成阵风锋,阵风锋的推进和过境导致大风;第三种是低空暖湿空气入流,在快要进入上升气流区时受到上升气流的抽吸作用而加速,导致地面大风。

北京地处华北平原西北边缘,西部、北部群山环抱,形成平均海拔高程 1000 m 的天然屏障,而东南部是一片逐渐低移的平原,夏季地面吹偏东风或东南风时,这种地形非常有利于触发强对流天气,而雷暴大风是强对流天气中主要灾害性天气之一(另外两个是冰雹和对流性暴雨),由于其发生、发展具有突发性,人们常来不及做好充分的应急准备,因而给人民正常生活带来严重影响,甚至威胁生命财产安全。如 2014 年 5 月 31 日 21 时许,北京市大兴区发生大风加阵雨天气,瞬时风力达 10 级以上,造成房屋、基础设施等损坏,家庭财产损失,农业作物及设施受损,其中农业受灾面积 58972.95 亩(粮食受灾面积 36746 亩,蔬菜受灾面积 2214 亩,西瓜受灾面积 3491 亩,果树受灾面积 6018 亩,设施受灾面积 3766.5 亩;1 亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$),乔木倒伏 13237 株,直接经济损失达 13094.7264 万元。再如,2014 年 6 月 10 日下午,北京市大兴区发生雷雨大风冰雹天气,最大风力达 9 级以上,造成小麦倒伏严重,果树落果,设施大棚受损,棚膜和棚架都有不同程度的损坏,农业经济损失达 16636.73 万元;工矿业损失 47 万元,基础设施损失 183.43 万元,家庭财产损失 118.7 万元;直接经济损失共计 16985.86 万元。雷暴大风对城市和农村的经济、居民健康和生命安全的负面作用越来越明显,而雷暴大风这种强对流天气具有生消快、影响范围小、局地性强等特点,目前预报此类天气还具有相当难度,因此深入研究雷暴大风的精细化气象灾害天气预警和提升短时预报能

力是十分重要而紧迫的任务,是保障人民生命财产安全和经济社会平稳发展的需要。

关于北京地区雷暴大风天气的临近预警技术,已有若干学者开展了一些相关的研究工作,为改善雷暴预警有一定的积极作用。王彦等(2006)、吴涛等(2009)、张家国等(2010)研究表明,雷暴大风与弓状回波相关,弓状回波顶部和向前突起部分产生的大风更强烈(吴翠红等,2012)。朱君鉴等(2008)从雷达回波的形态、回波顶高、风暴质心高度和风暴的最大反射率因子高度变化等分析了大风天气的发生发展。廖晓农等(2009)总结了北京地区雷暴大风的气候特征,并提出短时临近预报方法。东高红和吴涛(2007)和刁秀广等(2009)指出垂直积分液态水含量是地面灾害性大风的预报指标。俞小鼎等(2012)指出雷暴大风临近预报主要基于雷达回波特征,中层径向辐合和弓形回波有很好的指示作用;秦丽等(2006)依据北京近郊区 3 个测站的资料确定了雷暴大风日,并使用常规观测资料研究得出最有利于雷暴大风产生的探空结构为:低层暖湿,中高层有干冷空气,环境大气的的不稳定度较大并且风的垂直风切变也较大。梁爱民等(2006)利用 NCEP 资料,对北京地区 2000—2005 年夏季和 2006 年 5—6 月出现的 30 个雷暴大风日对流有效位能、对流抑制能量、大气可降水量等物理量平均场进行了研究,并提取了相关参数特征。王福侠等(2016)发现河北地区雷暴大风的主要雷达回波特征有弓形回波、阵风锋和径向速度大值区,出现其中一个或多个特征均可发布雷暴大风预警。

由以上分析可以看出,国内外学者利用探空或卫星雷达资料进行雷暴大风天气的分析和预报研究已经做了很多工作(廖晓农等,2004;应冬梅等,2007;余蓉等,2012;杨吉等,2012;李国翠等,2013),但针对雷暴大风天气过程中雷达资料的分析,大都是从雷达基本反射率因子和回波形态方面进行分析,对于径向速度的研究较少,且针对雷暴大风主要侧重于某次典型个例的分析(陈贵川等,2011;吴芳芳等,2009;钟加杰等,2009),还没有从大量个例统计分析的角度,系统探寻雷达基本反射率、径向速度在雷暴大风天气不同生命期内的特征。

为了对北京市雷暴大风的雷达回波特征进行全面的了解,本研究以气象观测站上报的大风灾情报告和北京加密自动站风场资料为根据,结合闪电定位仪资料,选取了 2010—2014 年发生在北京地区

19 个致灾的雷暴大风天气过程。从影响系统、移动路径、闪电正负性质、出现频次和雷达产品特征做了统计分析,总结了北京地区雷暴大风的普遍规律,同时提取了它的统计特征。

1 资料和方法

根据中国气象局编发的地面气象观测规范(崔讲学,2011),瞬时风速达到或超过 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (或目测估计风力达到或超过 8 级)的风记为大风。本研究以气象观测站上报的大风灾情报告和北京加密自动站风场资料为根据,结合闪电定位仪资料,选取了 2010—2014 年北京地区 19 个致灾的雷暴大风天气过程,利用探空实况资料对雷暴大风影响系统和移动路径进行了分类,利用闪电定位仪资料对雷暴大风过程的闪电特征进行了总结。并应用新一代多普勒天气雷达体扫资料的反射率因子和径向速度产品,通过定性、定量分析不同形态雷达回波不同生命期内的演变规律,以及雷达回波强度、回波顶高、垂直积分液态水含量、阵风锋、平均径向速度场等产品特征信息及其提前量,归纳总结了对雷暴大风提前预警具有指示作用的信息,再通过典型个例剖析,对每种类型雷暴大风雷达回波的演变规律进行分析。

2 影响系统和移动路径

依据产生的雷暴大风天气,利用探空实况资料进行了雷暴大风的天气形势类别分析,发现其主要受三类天气系统影响,一是高空冷涡后或前倾槽系统,共有 10 次过程,占有约 53%,此类系统一般高空为强冷平流主导,低空为暖平流主导,在此系统影响下,弓形回波和带状回波各出现了 4 次,块状回波出现了 2 次;二是后倾槽,共有 8 次过程,约占 42%,此类系统一般高空为西到西南气流,中低空为西南气流,整层都有一定的冷暖平流。在此系统影响下,带状回波出现了 4 次,弓形回波出现了 2 次,块状回波出现了 1 次;三是低空切变线,有 1 次过程,占 5%,此类系统高空没有明显的槽,中低空为明显的切变线,在此系统影响下,块状回波出现了 1 次。另外将影响北京地区的雷暴大风路径分为以下五类:西北路径占次数最多,有 9 次过程(占 47%),首先影响西北部山区,如延庆、门头沟,然后影响市

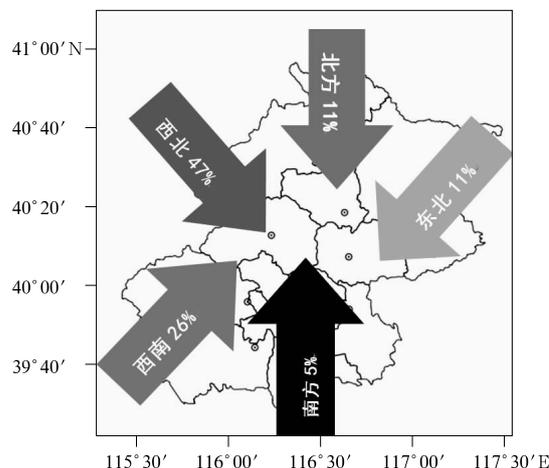


图 1 2010—2014 年北京地区雷暴大风雷达回波移动路径特征图

Fig. 1 Moving path map of radar echoes of thunderstorm gales in Beijing Area during 2010—2014

区及东部地区等,这类天气产生的雷暴大风灾害比较严重,影响范围较大,回波持续时间较长。次之是西南路径,有 5 次过程(占 26%),受西来槽影响的居多,一般先进入房山等地,这类天气灾害没有西北路径灾害严重。北方路径有 2 次(占 11%),尺度小,均为块状回波造成的雷暴大风,容易被忽视。东北路径有 2 次(占 11%),高空冷涡影响占主导地位。南方路径有 1 次(占 5%),此路径占次数最少,此路径下回波移动速度快,影响范围较大。

3 雷暴大风的闪电特征及主要回波特征

3.1 闪电特征

在北京 19 个雷暴大风个例中,共观测到 19406 个云地闪,其中负闪居多,为 16572 次,占 85%,平均强度为 31 kA;正闪较少,为 2834 次,占 15%,平均强度为 58 kA;负闪平均电流强度小于正闪平均电流强度。雷暴大风发生时,负地闪活跃,19 次过程中,有 4 次过程正闪活动较强,其余过程均以负闪为主,闪电密集区和雷达强回波区并不完全对应,多位于强回波区的边缘及附近,闪电密集区的移动和雷达强回波区移动方向基本一致,当回波强度减弱,回波区减小时,闪电发生频次也减少,有强回波出现的地方,不一定有闪电。

3.2 主要回波特征

产生雷暴大风的雷达回波有多种类型。本文按照雷达反射率因子产品在不同生命期内的回波形态及其演变方式,将产生雷暴大风的雷达回波分为带状回波、弓形回波、块状回波,其中带状回波 9 例,占 47%,弓形回波 6 例,占 32%,块状回波 4 例,占 21%。

3.2.1 带状回波

3.2.1.1 带状回波特征及其不同生命周期演变规律

带状回波为多个松散的对流回波单体相连排列成带状的回波,回波长度远大于回波宽度,有强回波核,传播方向与回波带垂直。带状回波基本反射率产品的一般特征:0.5°的回波强度为 50~55 dBz,1.5°的回波强度为 50~65 dBz,回波前缘梯度不如弓形回波强,带状回波产生的雷暴大风,一种是其本身的下沉气流产生的,另一种是其下沉气流的流出即阵风锋及其后侧的径向速度大值区产生的(本研究中共有 4 例带状回波产生阵风锋)。带状回波产生的雷暴大风一般出现在雷暴单体的附近或带状回波的前沿一带。

带状回波初始阶段是一些分散性对流单体或大

片混合性回波,在移动过程中各分散对流单体逐渐演变成有组织性的带状结构,单体回波强度有所增强,其移动方向前沿回波梯度逐渐增大;在成熟阶段,回波组织结构更加紧密,各对流单体回波增强较快,前沿回波强度和梯度迅速增强,其后部分布着较大范围弱回波区,此时带状回波移动速度开始加快,与后部混合性片状回波逐渐分离;到减弱阶段则表现为带状回波整个组织结构变得松散,单体之间开始分裂。

3.2.1.2 带状回波雷达产品回波特征

表 1 为带状回波雷暴大风的雷达回波特征,包括雷达回波强度、回波顶高、垂直积分液态水含量、阵风锋、平均径向速度场等产品特征信息及其提前量(其中“—”表示延迟时间)。径向速度是锥面上沿着雷达的径向速度,不等同于实际风速,本文将 0.5°和 1.5°仰角 17 m·s⁻¹以上径向速度区域定义为径向速度大值区(王福侠等,2016)。由表 1 可以看出,带状回波雷暴大风最强回波强度一般为 57~69 dBz,回波顶高为 11~17 km,垂直积分液态水含量为 35~60 kg·m⁻²。在平均径向速度图上,产生雷暴大风的带状回波常常对应应有径向速度大值区和中层径向辐合。本文中所有的带状回波个例(9 例)中,都出现了径向速度大值区,其中有 7 例先于雷暴

表 1 带状回波雷暴大风雷达产品回波特征

Table 1 Radar echo characteristics of thunderstorm gales casued by belt-shaped radar echo

个例/ 年/月/日	天气形势	最大回 波强度/ dBz	回波 顶高/ km	最大垂直 积分液态 水含量/ kg·m ⁻²	是否有 大风区/ 提前量	中气旋	是否有 中层径 向辐合/ 提前量	速度 模糊	入流 急流	阵风锋
2011/8/9	高空槽前, 低空切变线	62	11	55	有/ -48 min	无	无	无	有	有
2012/6/9	高空冷涡后部, 地面锋面	65	14	45	有/ 12 min	无	有/ 36 min	有	无	有
2012/7/10	高空冷涡后部, 地面低压辐合区	60	15	60	有/ -77 min	有	无	无	有	有
2013/6/24	高空槽前, 地面低压	64	14	50	有/ 21 min	有	有/ 18 min	有	有	无
2013/7/4	高空冷涡后部, 低空切变线	65	11	35	有/ 17 min	有	有/ 0 min	有	有	有
2013/7/31	高空槽前, 低空切变线	65	12	50	有/ 21 min	有	有/ 70 min	无	有	无
2013/8/4	高空槽前, 低空切变线	57	17	50	有/ 17 min	无	无	无	有	无
2014/6/6	高空冷涡后部, 地面低压	61	12	55	有/ 67 min	无	无	无	无	无
2014/6/17	高空槽前, 地面低压	69	14	60	有/ 69 min	无	无	无	无	无

大风出现,可见依据径向速度大值区能对 77.8% 的带状回波造成的雷暴大风天气提前发布预警。观测到中层径向辐合的有 4 例,占 44.4%,观测到入流急流的有 6 例,占 67%,观测到阵风锋的有 4 例,占 44.4%,这些都为雷暴大风的提前预警提供了重要指示特征。

3.2.1.3 带状回波的个例剖析

2013 年 7 月 4 日 15—18 时海淀、顺义、朝阳、大兴等地共 77 个站出现了 8 级以上雷暴大风,此次带状回波系统的发展演变主要包括以下几个阶段(图 2):(1)15:36—16:36(北京时,下同)发展阶段,

分散性的块状强回波(≥ 45 dBz)自延庆一带进入北京,回波组织性较差,在移动过程中,位于延庆的两块强对流单体出现局部增强,并于 16:00 合并为一块强单体,最大回波强度为 58 dBz。零星正闪在 15:48 出现,分布在回波移动路径前侧,16:06 闪电频数增到 $9 \text{次} \cdot 6 \text{min}^{-1}$,之后逐渐减小,以负闪为主,分布在回波周围 35~58 dBz 的回波中;延庆白河堡、千家店等地受此块强对流单体的影响在 15:53 开始出现了雷暴大风,径向速度图上自 15:36 开始,延庆的上游开始出现径向速度大值区。从雷达四维变分分析系统(VDRAS)反演的 185.7 m 低层

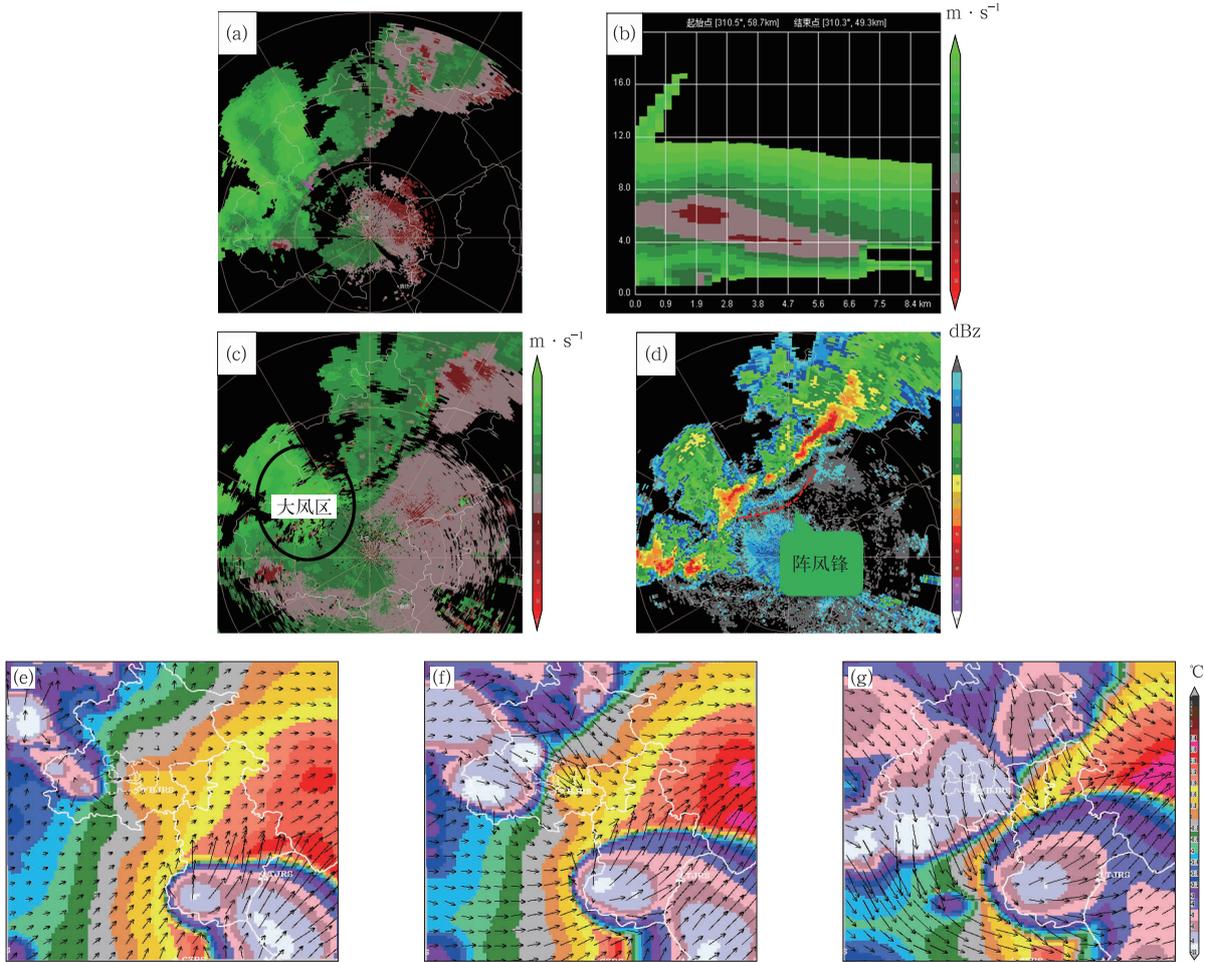


图 2 2013 年 7 月 4 日北京雷达回波产品

(a)16:36 平均径向速度图产品(3.4°);(b)图 2a 中紫色线的垂直剖面;(c)16:48 平均径向速度图产品(1.5°);(d)16:48 基本反射率产品(1.5°);(e)16:17,(f)17:05,(g)18:05VDRAS 反演的扰动温度场和风场(187.5 m)

Fig. 2 Radar products in Beijing on 4 July 2013

(a) base velocity at 16:36 BT (3.4°); (b) vertical section of the purple line in Fig. 2a; (c) base velocity at 16:48 BT (1.5°); (d) base reflectivity at 16:48 BT (1.5°); disturbance temperature field and wind field (187.5 m) inverted by VDRAS at 16:17 BT (e), 17:05 BT (f), and 18:05 BT (g), respectively

风场和扰动温度场(陈明轩等,2011;2016)可以看出,16:17,与西北方向下来的分散性强对流单体相对应区域近地面冷池已形成,中心最低扰动温度为 -8°C ,带状回波后部强的下沉冷空气出流(图2e)在地面形成非常强的辐散,其向前辐散的冷空气气流与暖湿的气流形成阵风锋(图2d),回波强度为 $5\sim 20\text{ dBz}$,昌平辛庄等地受阵风锋影响出现雷暴大风;东南部的冷池为早前一个雷暴所产生,与本个例无关。分散性的强对流单体在移动过程中,逐渐组织成带状分布。从平均径向速度可以看出,多单体风暴发展期中层为径向辐合结构(图2a,2b),15:54负的最小径向速度值为 $9\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,正的最大径向速度值为 $3\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,径向速度差值为 $12\sim 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,16:36径向速度差值增大为 $19\sim 23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明风暴内部上升气流逐渐增大,利于风暴的加强和维持。(2)16:36—17:12成熟阶段,16:36起,系统逐渐加强,发展成一条西北—东南走向的带状回波,回波前沿梯度大,后部紧跟着较大范围弱回波区,最大回波强度达 $60\sim 65\text{ dBz}$,垂直方向上强反射率因子核心($\geq 50\text{ dBz}$)的高度达到 $5\sim 6\text{ km}$,回波顶高约为 11 km ,垂直积分液态水含量为 $10\sim 50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 0.5° 和 1.5° 仰角平均径向速度图上有大范围的风速大值区。位于带状回波中段,即从昌平、门头沟一带自西北向东南扫过北京城区及南部地区的强对流回波,多个雷暴的下沉气流汇合形成一条完整的阵风锋,直到18时左右消失,阵风锋的移动速度略快于带状回波系统的移动速度,受阵风锋及其后部的径向速度大值区影响(最大速度达到 $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),在经过的区域(昌平、海淀、丰台、石景山、大兴、通州等地)出现雷暴大风天气。随着降水的持续,雨水蒸发冷却导致带状回波后部冷空气不断下沉,冷池强度增加,中心最低扰动温度达 -12°C 以上,冷池范围扩大,风暴的出流加强(图2f)。这个阶段,闪电图上开始出现正闪,正负闪频数基本都维持在 $3\text{次}\cdot(6\text{ min})^{-1}$ 。(3)17:12以后减弱阶段。带状回波整个组织结构变得松散,单体之间开始分裂,回波强度不断减弱。冷池强度减弱,但范围扩大,出流风场也不断向外扩展(图2g)。此阶段,闪电图上以正闪为主,并随回波强度的逐渐减弱而消失。

在出现雷暴大风的77个站中,由带状回波本身下沉气流产生的有54站,占 70.1% ,在这54个站中,观测到径向速度大值区的有26站,本个例中径

向速度大值区早于雷暴大风 $6\sim 30\text{ min}$ 出现,即本个例中依据径向速度大值区能够预测 33.8% 的带状回波雷暴大风;由带状回波下沉气流的出流即阵风锋产生的有23站,占 29.9% ,阵风锋一般提前于雷暴大风出现,即依据带状回波前侧阵风锋回波能够预测 29.9% 的带状回波雷暴大风。

3.2.2 弓形回波

3.2.2.1 弓形回波特征及其不同生命周期演变规律

弓形回波是指快速运动的、向前凸起的、形如弓的强对流回波,弓形回波基本反射率产品的一般特征: 0.5° 的回波强度为 $50\sim 55\text{ dBz}$, 1.5° 的回波强度为 $50\sim 65\text{ dBz}$,回波顶位于低层强反射率因子区之上,强回波带后侧有弱回波通道或后侧入流缺口,回波前缘反射率因子梯度很强,有时到成熟阶段,冷性下沉气流在近地面向外扩展,与强对流单体运动前方的暖湿空气交汇形成阵风锋(本研究中共有4例弓形回波产生阵风锋),阵风锋经过处常出现雷暴大风天气(黄旋旋等,2008)。弓形回波主体维持时间与雷暴大风维持时间基本一致,弓形回波产生的雷暴大风发生在其前侧凸起处。弓形回波基本速度产品的特征: 0.5° 的多普勒径向速度图上,一般会出现速度大于 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的入流速度区域,有时会出现速度模糊。 1.5° 的多普勒径向速度图上,在大风出现的地点,一般会出现大于 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的后侧入流急流(本研究所有个例都出现了后侧入流急流和径向速度大值区),有时会出现速度模糊,后侧入流急流向下沉气流提供干燥和高动量的空气,通过垂直动量交换和增加的雨水蒸发,增加地面附近出流的强度(Przybylinski and Gery,1983)。另外产生雷暴大风的弓形回波个例中,都在雷暴大风出现前出现了中层径向辐合。中层径向辐合被定义为一个对流风暴中层(通常 $3\sim 9\text{ km}$)的集中辐合区,代表由前向后的强上升气流和后侧入流急流之间的过渡区(Przybylinski,1995),利用中层径向辐合可提前预报大风(Schmocker et al,1996)。

弓形回波初始阶段是一些零散分布的对流单体,在移动过程中各分散对流单体逐渐演变成有组织性的带状结构,随着带状回波的发展,其后部出现入流急流和弱回波区,回波结构发展为弓形回波系统。在成熟阶段,后侧入流急流有所增强,面积不断增大,弓形曲率不断增大,前沿回波强度和梯度迅速增强;到减弱阶段则表现为弓形回波强度梯度和曲

率明显减小,整个组织结构变得松散。

3.2.2.2 弓形回波雷达产品回波特征

表 2 为弓形回波雷暴大风的雷达回波特征,包括雷达回波强度、回波顶高、垂直积分液态水含量、阵风锋、平均径向速度场等产品特征信息。由表 2 可以看出,最强回波强度一般为 62~69 dBz,回波顶高为 11~14 km,VIL 为 28~70 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在平

均径向速度图上,统计表明,产生雷暴大风的弓形回波个例中,都在雷暴大风出现前出现了径向速度大值区、中层径向辐合和入流急流,可见依据径向速度大值区能对 100% 的弓形回波造成的雷暴大风天气提前发布预警,而其中有 67% 可提前 30 min 发布预警。另外观测到阵风锋的有 5 例,占 83%,这些特征为提前做好雷暴大风的预警提供了重要信息。

表 2 同表 1,但为弓形回波

Table 2 Same as Table 1, but for bow radar echo

个例/ 年/月/日	天气形势	最大回 波强度/ dBz	回波 顶高/ km	最大垂直 积分液态 水含量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	是否有 大风区/ 提前量	中气旋	是否有 中层径 向辐合/ 提前量	速度 模糊	入流 急流	阵风锋
2011/6/23	高空冷涡后部, 地面倒槽	68	11	55	有/ 35 min	无	有/ 23 min	有	有	有
2012/6/21	高空槽前, 地面辐合	62	14	70	有/ 60 min	无	有/ 73 min	有	有	有
2014/5/31	高空冷涡后部, 地面偏东风	63	11	40	有/ 51 min	有	有/ 69 min	无	有	有
2014/6/8	高空冷涡后部, 地面低压辐合区	65	11	28	有/ 19 min	无	有/ 79 min	无	有	有
2014/6/13	高空冷涡后部, 地面辐合	68	14	60	有/ 14 min	有	有/ 74 min	无	有	有
2014/8/21	高空横槽, 低空切变线	69	14	60	有/ 83 min	无	有/ 80 min	无	有	无

3.2.2.3 弓形回波雷暴大风的个例剖析

2012 年 6 月 21 日 20:00—21:30 出现了雷暴大风,此次弓形回波系统的发展演变主要包括以下几个阶段(图 3):(1)19:36—20:06 发展阶段,大兴西南部雷暴单体合并形成的线状多单体风暴(图 3a)向东北方向移动,零星负闪分布在回波移动路径前侧 35~55 dBz 的回波中,零星正闪分布在回波移动路径后侧的 30~40 dBz 的回波中。在 1.5° 仰角雷达径向速度图上可观测到多单体风暴达到 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的后侧入流急流(图 3c);20:42, 0.5° 仰角雷达径向速度图上,后侧入流急流速度明显增大并出现速度模糊。中层径向辐合特征显著,高度约在 4~8 km(图 3d),4 km 以下出现了辐散场,说明单体已经出现强的下沉气流, 3.4° 仰角雷达径向速度图上,负的最小径向速度值为 $16 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 正的最大径向速度值为 $12 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 径向速度差值为 $28 \sim 33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时,强回波高度降低,强回波后部出现明显的弱回波通道,其位置与径向速度大值区相对应,说明下沉气流已经入侵到风暴后部低层区域(图 3b)。从 19:41 雷达四维变分分析系统

(VDRAS)反演的 185.7 m 低层风场和扰动温度场(图 3i),在弓形回波的发展阶段,北京地区低层环境风场为偏东风和偏南风控制,为暖湿气流,河北中部降水导致的近地面冷池已形成,中心最低扰动温度为 -5°C 左右,风暴前沿风场也出现出流特征。(2)20:06—20:54 成熟阶段,多单体雷暴演变成弓形回波系统,继续向东北方向移动,后部弱回波区通道更加清晰(图 3e),闪电图上,此阶段以负闪为主,负闪频率至 20:36 骤增至 $19 \text{ 次} \cdot (6 \text{ min})^{-1}$,负闪集中在弓形回波左后侧的拐弯处。 0.5° 仰角雷达径向速度图上,大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的后侧入流急流和速度模糊(图 3g)一直维持到 20:36。20:12,带状回波后部强的下沉冷空气出流在地面形成非常强的辐散,其向前辐散的冷空气气流与暖湿的气流形成阵风锋(图 3e),阵风锋刚形成时,由于雷暴出流的强度较弱,所以其运动速度也较慢。之后伴随着出流冷空气范围的不断扩大,冷池强度的增加(图 3j),风暴出流加强,阵风锋衰亡时间为 21:36;弓形回波系统的凸起造成了大兴榆堡、礼贤、安定(20:12—20:19)出现了 8 级以上大风,弓形回波系统下沉气流的出流,即

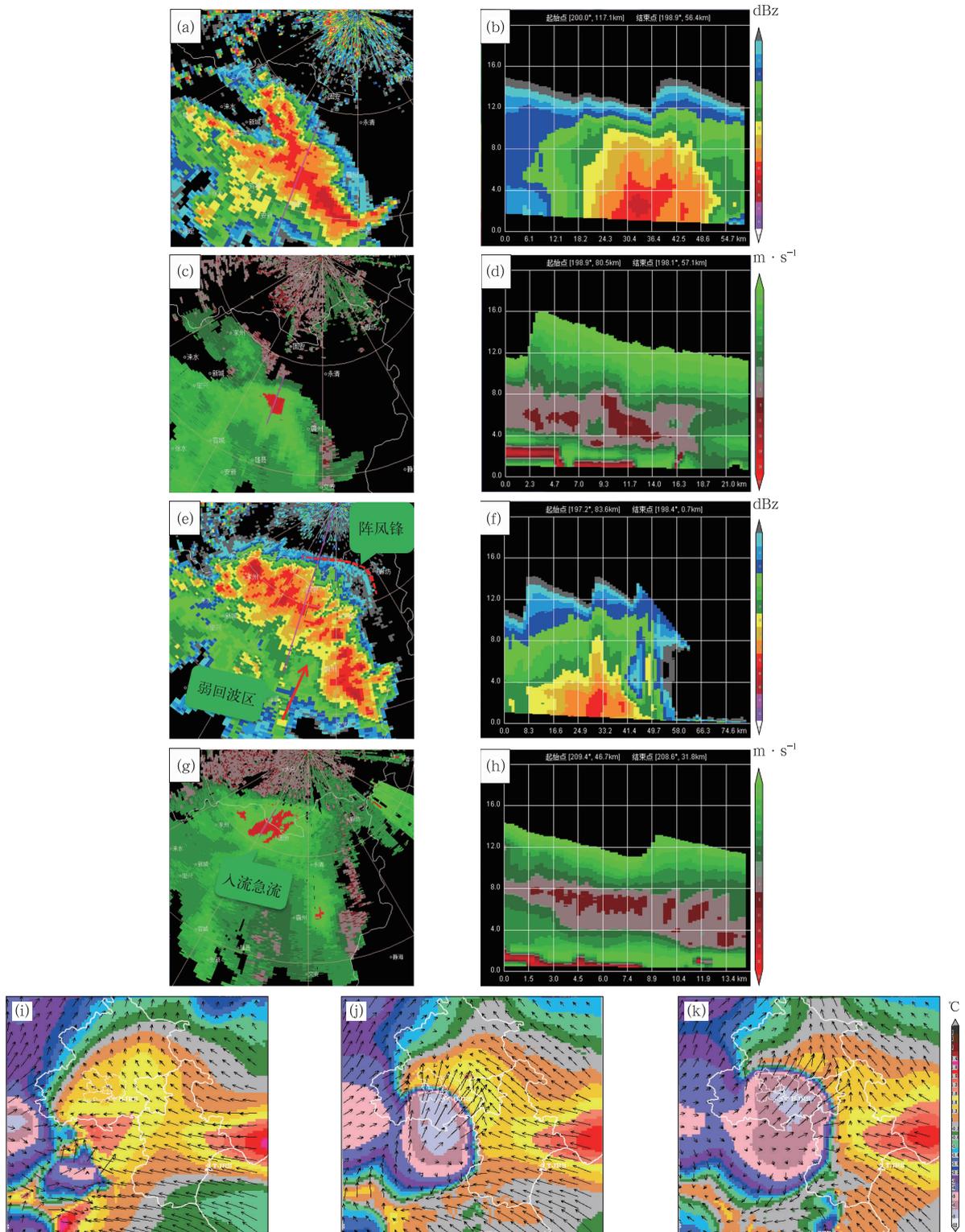


图 3 2012 年 6 月 21 日北京雷达回波产品
 (a)19:42 和(e)20:12 基本反射率产品(1.5°);(c)19:42 和(g)20:12 平均径向速度产品(0.5°);
 (b,d,f)分别为图 3a,3c,3e 和 3g 中紫色线的垂直剖面;(i)19:41,(j)20:53 和
 (k)21:29 VDRAS 反演的扰动温度场和风场(185.7 m)
 Fig. 3 Radar base reflectivity (1.5°) at (a) 19:42 BT and (e) 20:12 BT, base velocity (0.5°)
 at (c) 19:42 BT and (g) 20:12 BT; vertical sections of purple lines in (b) Fig. 3a, (d) Fig. 3c,
 (f) Fig. 3e and (h) Fig. 3g, respectively; disturbance temperature field and wind field (185.7 m) inverted
 by VDRAS at (i) 19:41 BT, (j) 20:53 BT, (k) 21:29 BT 21 June 2012

阵风锋造成了大兴魏善庄、庞各庄、定福庄、北臧村、亦庄(20:20—20:40),丰台大红门、新发地、鹰山公园(20:36—20:47),通州马驹桥(20:31),朝阳王四营(20:48),海淀车道沟、北安河(20:57—21:28)等地出现了8级以上大风。(3)20:54以后减弱阶段。弓形回波结构在向东北移动的过程中,整个组织结构变得松散,回波强度减弱,后部的层状云结构迅速扩大,径向速度较之前时刻明显减小。冷池强度减弱,范围减小,出流风场不断向北扩展。

在出现雷暴大风的16个站中,由弓形回波本身下沉气流产生的有3站,依据这一回波特征能够提前6~13 min预测18.8%的雷暴大风;由弓形回波下沉气流的出流,即阵风锋产生的有13个站,能够提前12~60 min预测81.2%的雷暴大风。这16个站中,在0.5°和1.5°仰角径向速度图上都观测到了径向速度大值区,本个例中径向速度大值区早于雷暴大风60 min出现,即本个例中依据径向速度大值区能够预测100%的带状回波雷暴大风。

3.2.3 块状回波

3.2.3.1 块状特征及其不同生命周期演变规律

块状回波为对流单体回波,多表现为孤立风暴单体块,回波面积较小,内部结构密实,具有明显的局地性、突发性和移动快的特征,一般由局地发展的回波加强到50 dBz以上,或者局地回波和上游移动来的回波合并加强造成;块状回波基本反射率产品

的一般特征为:初始阶段回波零散,单体强度较强,在移动过程中与新生单体合并可发展为组织性的强回波块。成熟阶段时,0.5°和1.5°的回波强度分别为50~60和50~65 dBz。减弱阶段时,回波强度开始减弱。块状回波产生的雷暴大风一般出现在雷暴单体附近,本研究中孤立的块状回波前侧均未观测到阵风锋回波,对应径向速度图上一般有中气旋和 中层径向辐合存在,未观测到明显的径向速度大值区。

3.2.3.2 块状回波雷达产品回波特征

表3为块状回波雷暴大风的雷达回波特征,包括雷达回波强度、回波顶高、垂直积分液态水含量、阵风锋、平均径向速度场等产品特征信息,由表3可以看出,最强回波强度一般为61~67 dBz,回波顶高为9~14 km,VIL为35~70 kg·m⁻²。在平均径向速度图上,统计表明,产生雷暴大风的块状回波个例中,出现径向速度大值区的有2例,其中有1例出现在雷暴大风之后,可见依据径向速度大值区能对25%的块状回波造成的雷暴大风天气提前发布预警。观测到中层径向辐合的有2例,占50%,从出现中层径向辐合到雷暴大风出现的时间差为30 min以上,观测到中气旋的有2例,占50%,这些为雷暴大风的提前预警提供了重要指示特征。本研究中孤立的块状回波前侧均未观测到阵风锋回波,径向速度图未观测到入流急流。

表3 同表1,但为块状回波

Table 3 Same as Table 1, but for block echo

个例/ 年/月/日	天气形势	最大回 波强度/ dBz	回波 顶高/ km	最大垂直 积分液态 水含量/ kg·m ⁻²	是否有 大风区/ 提前量	中气旋	是否有 中层径 向辐合/ 提前量	速度 模糊	入流 急流	阵风锋
2010/5/31	高空冷涡后部, 低空切变线	61	9	35	无	无	有/ 36 min	无	无	无
2012/5/19	低空切变线, 地面偏东风	67	12	70	有/ -4 min	有	无	无	无	无
2013/6/11	高空槽后, 地面辐合线	67	9	50	无	有	无	无	无	无
2014/6/15	高空槽前, 地面低压辐合区	65	14	55	有/ 16 min	无	有/ 58 min	无	无	无

3.2.3.3 块状回波的个例剖析

2012年5月19日20—21时平谷、怀柔出现了雷暴大风,此次块状回波系统的发展演变主要包括以下几个阶段(图4):(1)18:54—20:06发展阶段,位于昌平的对流单体群整体向东北方向移动,19:24

最前沿单体开始发展,其他单体则逐渐减弱,在发展北上的过程中,回波强度不断加强,结构变得更加紧密,怀柔本地于19:42生成对流单体,并不断发展加强,此阶段闪电图上以正闪为主,正闪频率基本维持在5~6次·(6 min)⁻¹,19:54增至9次·(6 min)⁻¹,

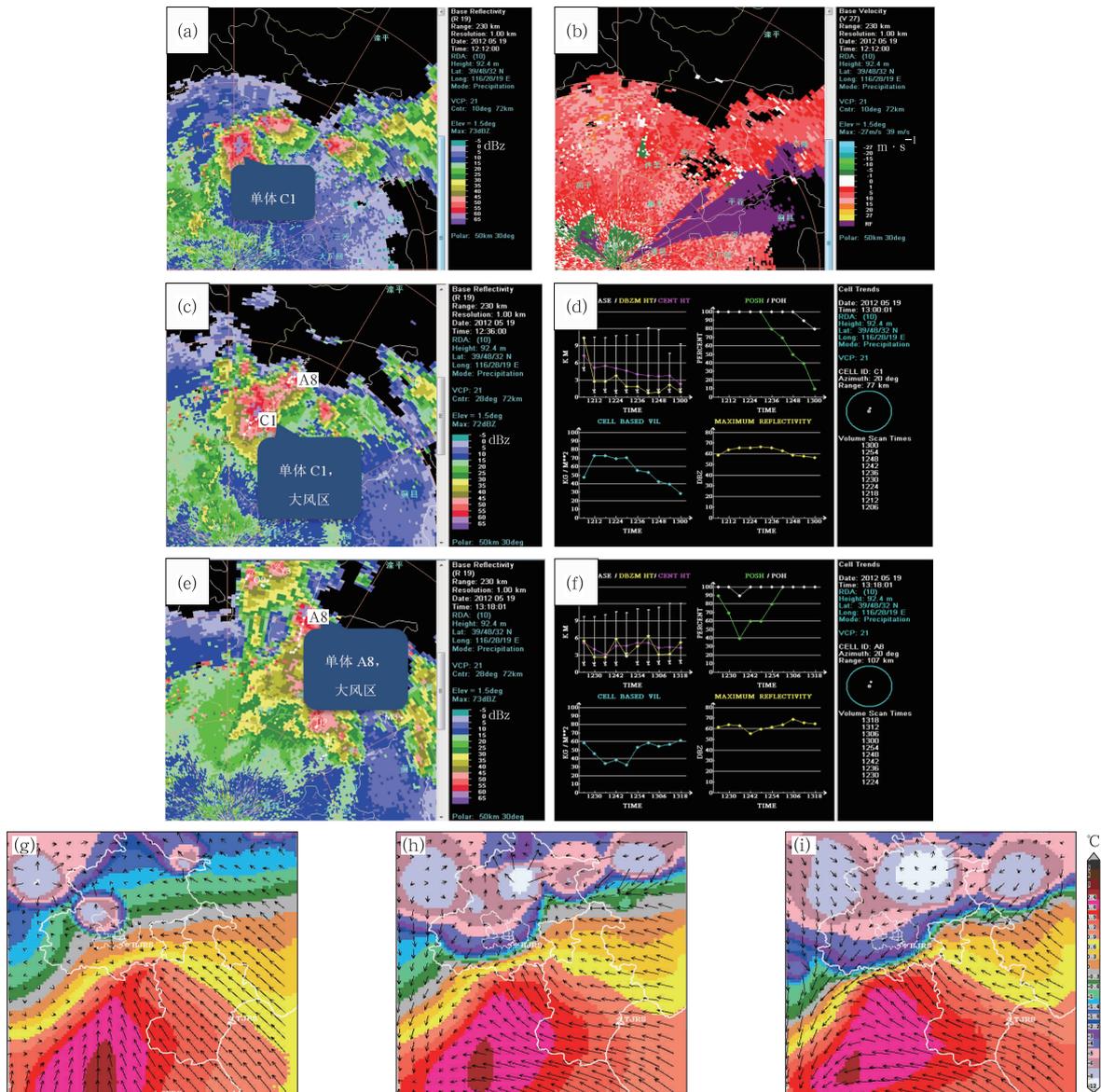


图 4 2012 年 5 月 19 日北京雷达回波产品

(a) 20:12, (c) 20:36 和 (e) 21:18 基本反射率产品 (1.5°); (b) 20:12 平均径向速度产品 (1.5°);
 (d) 20:00—20:36 和 (f) 20:24—21:18 风暴趋势; (g) 19:05, (h) 20:47 和
 (i) 21:41 VDRAS 反演的扰动温度场和风场 (185.7 m)

Fig. 4 Radar base reflectivity (1.5°) at (a) 20:12 BT, (c) 20:36 BT and (e) 21:18 BT; base velocity (1.5°) at (b) 20:12 BT; storm trends at (d) 20:00—20:36 BT and (f) 20:24—21:18 BT; disturbance temperature field and wind field (185.7 m) inverted by VDRAS at (g) 19:05 BT, (h) 20:47 BT and (i) 21:41 BT 19 May 2012

分布在 35~55 dBZ 的回波块中。19:48—20:00 速度图上出现了中气旋特征,且中气旋对应强回波区,说明单体风暴仍在发展阶段。从 19:05 雷达四维变分分析系统(VDRAS)反演的 185.7 m 低层风场和扰动温度场(图 4g),在块状回波的发展阶段,与块状回波相对应的区域近地面冷池已形成,中心最低

扰动温度为-8℃左右,风暴前沿风场也出现出流特征,平原地区低层环境风场为暖湿的偏东风。(2) 20:06—21:30 成熟阶段,块状回波后部冷空气不断下沉,冷池强度增加,中心最低扰动温度达-12℃以上,冷池范围扩大,风暴的出流加强(图 4h),从昌平发展北上的强回波于 20:30 前后与怀柔本地生成的

强回波合并为一个强对流单体 C1(图 4c),继续向东北方向移动,此阶段闪电图上,21:12 之前,仍然以正闪为主,正闪频率基本维持在 $9 \text{次} \cdot (6 \text{min})^{-1}$,分布在 $40 \sim 60 \text{ dBz}$ 的回波中,之后正闪逐渐减少,负闪出现频率增加,21:18,负闪频率达到主峰值 $16 \text{次} \cdot (6 \text{min})^{-1}$ 。从 CINRAD/SA 雷达风暴趋势产品可以看出(图 4d),成熟阶段回波强度维持在 60 dBz 以上,垂直积分液态水含量在 20:06 为 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,20:12 突增至 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,说明云内已有较大的粒子形成,怀柔出现了 13 mm 大小的冰雹。20:30 后,垂直积分液态水含量开始迅速下降,减少 $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,意味着地面灾害大风的开始(东高红和吴涛,2007);垂直方向上最大反射率因子回波顶高在 20:06 达 10 km 以上,而 20:12 开始强中心高度迅速下降至 3 km ,强中心顶高的下降使得下沉气流加强,怀柔本站于 20:26 出现了 $19.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雷暴大风,说明单体风暴已处于成熟阶段,主要以下击暴流为主。风暴所经之地,怀柔本站、怀北,密云、三峪培训基地、不老屯、东邵渠等地出现了八级以上雷暴大风。(3)21:30 以后减弱阶段,块状回波回波强度明显减弱,垂直积分液态水含量明显下降,回波顶高下降。冷池范围扩大,出流风场向外扩展,但出流风场减弱(图 4i)。此阶段,闪电图上以负闪为主,并随回波强度的逐渐减弱而消失。

在出现雷暴大风的 6 个站中,由孤立块状回波本身下沉气流产生的有 6 站,孤立的块状回波前侧未观测到阵风锋回波,径向速度图上在雷暴大风出现 4 min 后观测到较小范围的径向速度大值区,即本个例中很难依据径向速度大值区或阵风锋预测雷暴大风。

4 结 论

本研究以气象观测站上报的大风灾情报告和北京加密自动站风场资料为根据,结合闪电定位仪资料,选取了 2010—2014 年北京地区 19 个致灾的雷暴大风天气过程,利用探空实况资料对雷暴大风影响系统和移动路径进行了分类。并应用新一代多普勒天气雷达体扫资料的反射率因子和径向速度产品,通过定性、定量分析不同形态雷达回波不同生命期内的演变规律,以及雷达回波强度、回波顶高、垂直积分液态水含量、阵风锋、平均径向速度场等产品特征信息及其提前量,归纳总结了对雷暴大风提前

预警具有指示作用的信息,再通过典型个例剖析,对每种类型雷暴大风雷达回波的演变规律进行分析。主要结论如下:

(1) 北京地区产生雷暴大风的雷达回波主要为带状回波、弓形回波、块状回波,其中带状回波 9 例,占 47%,弓形回波 6 例,占 32%,块状回波 4 例,占 21%。

(2) 北京地区雷暴大风主要受三类天气系统影响,一是高空冷涡后或前倾槽,共有 10 次过程,占有约 53%,在此系统影响下,弓形回波和带状回波各出现了 4 次,块状回波出现了 2 次;二是后倾槽,共有 8 次过程,约占 42%。在此系统影响下,带状回波出现了 4 次,弓形回波出现了 2 次,块状回波出现了 1 次;三是低空切变线,有 1 次过程,占 5%。

(3) 影响北京地区的雷暴大风路径分为以下五类:西北路径占次数最多,有 9 次过程(占 47%),首先影响西北部山区,如延庆、门头沟,然后影响市区及东部地区等,这类天气产生的雷暴大风灾害比较严重,影响范围较大,回波持续时间较长。次之是西南路径,有 5 次过程(占 26%),受西来槽影响的居多,一般先进入房山等地,这类天气灾害没有西北路径灾害严重。北方路径有 2 次(占 11%),尺度小,均为块状回波造成的雷暴大风,容易被忽视。东北路径有 2 次(占 11%),高空冷涡影响占主导地位。南方路径有 1 次(占 5%),此路径占次数最少,此路径下回波移动速度快,影响范围较大。

(4) 带状回波和弓形回波雷暴大风过程中,雷达径向速度图上大多会提前出现径向速度大值区,依据径向速度大值区能对 77.8% 的带状回波造成的雷暴大风天气提前发布预警,能对 100% 的弓形回波造成的雷暴大风天气提前发布预警,而其中有 67% 可提前 30 min 发布预警。另外,径向速度图上观测到的中气旋、中层径向辐合、入流急流、阵风锋都为雷暴大风的提前预警提供了重要指示特征。

(5) 孤立的块状回波前侧均未观测到阵风锋回波,径向速度图未观测到入流急流,径向速度大值区不明显。但径向速度图上观测到的中层径向辐合和中气旋等都为雷暴大风的提前预警提供了重要指示特征。

关于北京地区雷暴大风雷达回波演变特征的研究,尚待需要在定性分析的基础上,提出定量分析指标,提出识别雷暴大风天气过程的量化指标,建立雷暴大风发生概率预报模型,并更好地应用到预

报预警工作中。

致谢:感谢倪允琪、孙继松研究员等在研究工作中给予的指导和帮助。

参考文献

- 陈贵川, 谌芸, 乔林, 等, 2011. 重庆“5·6”强风雹天气过程成因分析[J]. 气象, 37(7): 871-879.
- 陈明轩, 王迎春, 高峰, 等, 2011. 基于雷达资料 4DVar 的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析[J]. 气象学报, 69(1): 64-78.
- 陈明轩, 肖现, 高峰, 等, 2016. 基于雷达四维变分分析系统的强对流高分辨率模拟个例分析和批量检验[J]. 气象学报, 74(3): 421-441.
- 崔讲学, 2011. 地面气象观测[M]. 北京: 气象出版社.
- 刁秀广, 张新华, 朱君鉴, 2009. CINRAD/SA 雷达风暴趋势产品在冰雹和大风预警中的应用[J]. 气象科技, 37(2): 230-233.
- 东高红, 吴涛, 2007. 垂直积分液态水含量在地面大风预报中的应用[J]. 气象科技, 35(6): 877-881.
- 黄旋旋, 何彩芬, 徐迪峰, 等, 2008. 5·6 阵风锋过程形成机制探讨[J]. 气象, 34(7): 20-26.
- 李国翠, 刘黎平, 张秉祥, 等, 2013. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别[J]. 气象学报, 71(6): 1160-1171.
- 梁爱民, 张庆红, 申红喜, 等, 2006. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象, 32(11): 73-80.
- 廖晓农, 2009. 北京雷暴大风日环境特征分析[J]. 气候与环境研究, 14(1): 54-62.
- 廖晓农, 王华, 石增云, 等, 2004. 北京地区雷暴大风日 θ_e 平均廓线特征[J]. 气象, 30(11): 35-37.
- 廖晓农, 于波, 卢丽华, 2009. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象, 35(9): 18-28.
- 秦丽, 李耀东, 高守亭, 2006. 北京地区雷暴大风的天气-气候学特征研究[J]. 气候与环境研究, 11(6): 754-762.
- 王福侠, 俞小鼎, 裴宇杰, 等, 2016. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J]. 应用气象学报, 27(3): 342-351.
- 王彦, 吕江津, 王庆元, 等, 2006. 一次雷暴大风的中尺度结构特征分析[J]. 气象, 32(2): 75-80.
- 吴翠红, 韦惠红, 牛奔, 2012. 湖北东部雷暴大风雷达回波特征分析[J]. 大气科学学报, 35(1): 64-72.
- 吴芳芳, 王慧, 韦莹莹, 等, 2009. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象, 35(1): 55-64.
- 吴涛, 张火平, 吴翠红, 2009. 一次初夏强对流天气的弓形回波特征分析[J]. 暴雨灾害, 28(4): 306-312.
- 杨吉, 刘黎平, 李国平, 等, 2012. 基于雷达回波拼图资料的风暴单体和中尺度对流系统识别、跟踪及预报技术[J]. 气象学报, 70(6): 1347-1355.
- 应冬梅, 许爱华, 黄祖辉, 2007. 江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J]. 气象, 33(3): 48-53.
- 余蓉, 张小玲, 李国平, 等, 2012. 1971—2000 年我国东部地区雷暴、冰雹、雷暴大风发生频率的变化[J]. 气象, 38(10): 1207-1216.
- 俞小鼎, 姚秀平, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社: 91-93, 129, 156, 163-170.
- 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.
- 张家国, 王平, 吴涛, 2010. 鄂东一次下击暴流天气的中尺度分析[J]. 气象科学, 30(2): 239-244.
- 钟加杰, 李萍, 刘峰, 2009. 一次热带气旋外围爬线对广州白云机场的影响[J]. 气象, 35(6): 70-76.
- 朱君鉴, 刁秀广, 曲军, 等, 2008. 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, 34(12): 21-27.
- Przybylinski R W, 1995. The bow echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods[J]. Wea Forecasting, 10(2): 203-218.
- Przybylinski R W, Gery W J, 1983. The reliability of the bow echo as an important severe weather signature [C] // Preprints, 13th Conf. on Severe Local Storms, Tulsa; American Meteorological Society: 270-273.
- Schmocker G K, Przybylinski R W, Lin Y J, 1996. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature [C] // Preprints, 15th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk; American Meteorological Society: 306-311.