

王洪峰,周涛,王清川,等.廊坊市雷暴大风多普勒雷达特征指标预警应用分析[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):114-122.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



廊坊市雷暴大风多普勒雷达特征指标 预警应用分析

王洪峰¹,周涛²,王清川^{2*},郭志强³,黄浩杰²,王鹤婷²,刘淇淇²

(1.邯郸市气象局,河北 邯郸 056001;2.廊坊市气象局,河北 廊坊 065000;

3.保定市气象局,河北 保定 071000)

摘要:利用北京、天津和沧州多普勒天气雷达对2010—2019年廊坊市发生的29次雷暴大风天气过程中的阵风锋、径向速度大值区、垂直累积液态水含量(VIL)≥40 kg·m⁻²等预警指标进行验证分析,结果表明:51.9%的站次出现了阵风锋,其中61.0%的雷暴大风出现在主体回波移动前方中部到右侧;17 m·s⁻¹以上大风速区作为预警指标,预警的平均提前量达47.2 min。100%的弓形回波雷暴大风出现前上游及可能影响区域存在≥17 m·s⁻¹的大风速区,以此发布预警可提前37.1 min;71.4%的雷暴大风站点上空或10 km范围内VIL≥40 kg·m⁻²,平均预警提前量最高,达到52.7 min;依据带状回波前侧或右前侧出现阵风锋发布预警的平均提前量为60.6 min。73.7%的块状回波雷暴大风天气上游及可能影响区域有≥17 m·s⁻¹的大风速区。结合上游及可能影响区域≥17 m·s⁻¹和≥20 m·s⁻¹大风速区、阵风锋、VIL≥40 kg·m⁻²出现位置可以提前30~60 min发布雷暴大风预警信号,且可更加精准地预测灾害性大风的落区、出现时间和强度。

关键词:雷暴大风;雷达回波特征;预警指标;阵风锋;弓形回波

中图分类号:P457.9

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)02-0114-09

雷暴大风具有突发性、局地性强、预警难度大、致灾概率高等特点,常常造成严重的经济财产损失,甚至是人员伤亡。就河北省廊坊市而言,雷暴大风成灾个例及造成的经济损失呈逐年上升趋势,例如,2020年6月25日夜间,北京东南部至河北廊坊市中部到天津西南部地区先后出现强雷暴大风天气,伴随短时强降水和冰雹,区域自动站极大风速达到28.5 m/s(11级)。据统计,此次强雷暴大风天气仅在廊坊地区就造成10余个乡镇不同程度受灾,农作物、

果树、大棚蔬菜等损失严重,受灾面积达1.4万hm²,其中绝收面积1.1万hm²,直接经济损失约4.9亿元。因此,从不同方向深入研究雷暴大风,特别是基于多普勒雷达资料研究如何提高预警准确率和提前量,是非常必要的。

目前,雷暴大风的临近预警主要基于多普勒天气雷达回波特征,以预报员主观分析为主,客观自动化算法产品为辅^[1-2]。诸多气象学者针对雷暴大风临近预警中多普勒雷达产品的应用技术开展了大量研究,总结出多种可供参考的预警指标,对改善和提升雷暴大风预警有一定的积极作用。如孙继松等^[3]、俞小鼎等^[4]、刁秀广等^[5]应用多普勒雷达针对雷暴大风的研究表明,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。廖晓农等^[6-7]研究发现北京地区VIL、最大反射率因子高度、7 km以上最大反射率因子等6个与雷达观测和环境有

收稿日期:2022-09-02;修回日期:2022-11-24

基金项目:中国气象局预报员项目(CMAYBY2020-012);河北省气象局科技项目(21zc06)

作者简介:王洪峰(1983—),男,工程师,主要从事天气预报与气象服务研究。E-mail:175950642@qq.com

通信作者:王清川(1978—),男,正高级工程师,主要从事灾害性天气短临预报预警研究。E-mail:hblfwqc@163.com

关因子与地面短时强阵风有较好的对应关系。东红等^[8]、王彦等^[9-10]发现 $VIL \geq 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 后快速减小对于预警雷暴大风天气有指示意义,一般能提前 10 min。刘希文等^[11]发现中气旋、钩状回波、阵风锋、弓形回波和中低层径向速度辐合等雷达回波特征对雷暴大风预警具有较好的指示意义。孙密娜等^[12]研究发现中层强辐合和风暴顶辐散产生强下沉气流,地面最大风速出现在中气旋发展和冷池合并阶段。杨璐等^[13-14]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,其中有 67.0% 可提前 30 min 发布预警。龙柯吉等^[15]研究发现,四川盆地 82% 的雷暴大风站点具有风速大值区。河北省也有许多相关研究成果,如王福侠等^[16]研究表明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。杨晓亮等^[17]发现低层径向速度大值区预警秋季飊线大风需提高阈值。阎访等^[18]发现阵风锋具有风向风速辐合的区域经过测站时,会带来风速突增甚至大风天气,相反,则不会造成风速突变。王清川等^[19]发现 $\geq 55 \text{ dBZ}$ 强回波迅速向高层伸展后迅速下降并配合较低的强回波质心高度,预示地面将出现大冰雹和灾害性大风。

以往研究基于多普勒雷达资料对不同省市和地区的一次或多次典型雷暴大风天气过程进行统计分析,总结出了可供临近预警参考的指标,而将这些临近预警指标进行系统检验分析的成果较少。本文从廊坊市实际临近预警业务需求出发,结合地面加密风场数据,从大量个例统计中系统检验分析不同雷达回波形态的雷暴大风天气过程中阵风锋、径向速度大值区、 $VIL \geq 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 等雷暴大风临近预警指标,应用更加高效的雷暴大风临近预警指标并优化预警流程,以期为雷暴大风临近预警提供科学参考,进一步提升雷暴大风预警的准确率和提前量。

1 资料与方法

1.1 雷暴大风的定义

雷暴大风是指伴随强雷暴天气出现的强烈短时大风,也称雷雨大风,即在电闪雷鸣时出现风力 > 8 级的瞬时大风^[3]。《风力等级》(GB/T 28591—2012)^[20]规定 8 级风风速为 $17.2 \sim 20.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。《强对流天气等级》^[21]气象标准将对流性大风定义为:由于大气强对流造成的地面阵性大风。若伴随雷暴、雷雨出现,亦称雷暴大风或雷雨大风。本文参考王福侠等^[16]

对雷暴大风定义,规定在一个观测日内(20 时—次日 20 时),有 1 个及以上测站瞬时风速 $\geq 17.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并伴有雷暴的大风天气出现,记为 1 次雷暴大风过程。2013 年之后,由于观测业务改革,本市地面气象观测站不再编发雷暴的重要天气报,为更准确的认定雷暴大风天气,本文利用闪电定位仪数据辅助判断是否发生雷暴。

1.2 资料与方法

风向风速资料为 2010—2019 年廊坊辖区 9 个气象观测站的观测资料和区域自动站风场资料。雷达资料来源于北京、天津和沧州多普勒天气雷达,位置见图 1。根据造成雷暴大风强对流云体的位置,以距离较近的多普勒天气雷达探测资料为主进行分析,另外两部雷达探测资料为补充。所用资料均经过质量控制。

采用雷达气象学方法对所选典型天气过程的多普勒雷达产品进行逐体扫的详细分析,对比检验分析几种常用多普勒天气雷达预警参考指标的预警能力。

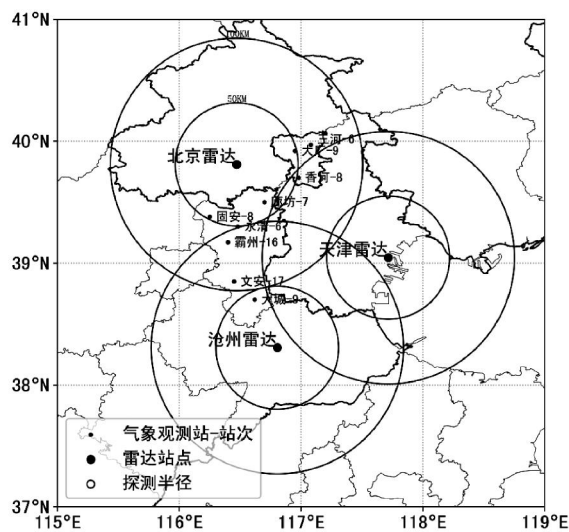


图 1 廊坊市周边多普勒天气雷达位置及各站雷暴大风出现站次空间分布

2 结果分析

2.1 廊坊雷暴大风天气过程分类与指标选取

2.1.1 雷暴大风天气过程的选取

对廊坊市上述 9 个国家地面气象观测站 2010—2019 年的观测数据进行统计分析,并将 9 个观测站所在的行政区作为研究范围,按照雷暴大风的标准检索出雷暴大风天气过程 55 个,共计 86 站次,由空间分布(图 1)可知,霸州和文安分别为 16 和 17 站次,明显多于其他县市,在所有雷暴大风天气过程中有 34 次同时伴有冰雹、短时强降水等灾害性天气,

合计有 123 站次。由于雷达资料缺失等原因,本文仅对 29 次雷暴大风天气过程进行具体分析,涉及 81 站次。

2.1.2 雷暴大风多普勒雷达回波特征分类

一次天气过程影响范围多数会跨越多个地市区行政区域,甚至是跨越多个省市,在其移动路径上会出现多种灾害性天气,本文统计范围仅限廊坊,如只按廊坊本地监测到的灾害性天气种类来划分天气过程的种类有不妥之处,所以本文研究与实际多普勒雷达业务结合,根据收集灾情实况,按照多普勒雷达基本反射率因子的形态特征将雷暴大风个例概况分为 4 类:弓形回波(包括镶嵌有弓形回波的飑线、镶嵌有超级单体的弓形回波)、带状回波、孤立块状回波、其他。回波特征是动态演变的,划分标准是廊坊辖区内某站点出现灾害性天气前及灾害发生时的雷达回波特征,早前期和灾害大风出现后的回波演变特征暂不考虑。按照上述标准,本文梳理 29 个雷暴大风天气过程,其中弓形回波 14 站次、带状回波 45 站次、块状回波 19 站次,其他 3 站次,占比分别为 17.3%、55.6%、23.5%和 3.6%。

2.1.3 常用雷暴大风多普勒雷达临近预警特征指标选取

将每次雷暴大风过程中灾害性天气影响区域内的多普勒雷达基本反射率因子(R)、基本径向速度(V)、垂直累积液态水含量(VIL)、龙卷涡旋特征、中气旋等 5 种雷达产品的反射率因子强度、阵风锋是否出现,上游及可能影响区域是否出现 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区、极大风速值,是否出现中气旋,回波的移速、垂直液态降水积分总含量(VIL)以及回波顶高 33 个因子进行量化统计,从中选取本地雷暴大风临近预警业务中方便获取且常用的多普勒天气

雷达预警参考指标:阵风锋、雷暴大风出现站点 25 km 范围内的上游及可能影响区域 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区、 $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区、中气旋、旋转速度 $\geq 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $VIL\geq 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、发生地 10 km 范围内冰雹指数(HI)、龙卷涡旋特征(TVS)、中气旋(M)等 9 项,进行逐项逐体扫描雷达产品分析,统计雷暴大风出现前预警指标是否出现以及预警提前量(某一种预警指标出现到国家地面气象观测站或区域自动站发生雷暴大风的时间)大小等。

2.2 雷暴大风多普勒天气雷达临近预警指标检验

2.2.1 不分类临近预警指标检验

2010—2019 年廊坊 78 站次雷暴大风天气的统计见表 1。有 41 站次出现阵风锋,占 51.9%,平均提前量为 36 min,从阵风锋出现位置统计,仅有 2 站次出现在主体回波移动方向的左前方,占 4.9%;14 站次出现在主体回波移动方向的正前方,占 34.1%;出现在主体回波前方中部到右侧的有 25 站次,占 61.0%。结合出现雷暴大风站点的位置,雷暴大风均出现在主体回波移动路径及路径的右侧,且均是阵风锋过境之后,时间间隔不一。

统计 0.5° 仰角径向速度,上游及可能影响区域出现 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区的站次比例最高,有 61 站次,占 78.2%,以此为指标发布预警的平均提前量为 47.2 min,为所有预警指标中预警提前量最大。有 53 站次出现 $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区,占 67.9%,平均提前量为 45.4 min。有 41 站次的 $VIL\geq 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,占比 56.9%,平均提前量为 41.3 min。39 站次旋转速度 $\geq 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,占比 50%,平均提前量为 33.3 min(表 1)。冰雹指数产品(HI)上雷暴大风出现站点 10 km 范围内有预警提示的为 55 站次,达到 70.5%,平均提前量为 40.1 min。雷暴大风出现站点 10 km 范围内

表 1 2010—2019 年廊坊市雷暴大风常用多普勒雷达特征指标检验统计

统计项	出现站次 /站次	未出现站 次/站次	出现站次 占比/%	出现时间提 前量最大值 /min	出现时间 提前量中 位数/min	出现时间 提前量最 小值/min	平均时间 提前量 /min
阵风锋	41	37	51.9	117	34	7	36.6
上游及可能影响区域 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区	61	17	78.2	150	44	1	47.2
上游及可能影响区域 $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区	53	25	65.9	141	40	0	45.4
中气旋	13	65	16.7	55	19	0	18.4
旋转速度 $\geq 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	39	39	50.0	59	36	4	33.3
垂直液态降水积分总含量(VIL) $\geq 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$	41	31	56.9	155	36	0	41.3
发生地 10 km 范围内冰雹指数(HI)	55	23	70.5	100	42	0	40.1
发生地 10 km 范围内龙卷涡旋特征(TVS)	12	66	15.4	45	11.5	0	13.9
发生地 10 km 范围内中气旋(M)	28	50	35.9	83	18	0	22.2

注:0 表示此项雷达特征指标出现时,灾害性天气已经出现,无提前量。

出现中气旋或在龙卷涡旋特征(TVS)、中气旋(M)产品上出现预警提示的站次相对较少,对雷暴大风预警的指示,还需要进一步研究。

阵风锋、上游及可能影响区域出现 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速度区等 9 项常用雷暴大风多普勒雷达预警指标不是在所有雷暴大风天气过程都出现,因此无法用一种预警指标对所有雷暴大风进行预警研判,需要根据具体回波类型、发展阶段等采用多种预警指标进行综合研判。

2.2.2 弓形回波雷暴大风临近预警指标检验

2.2.2.1 弓形回波前侧的阵风锋特征

俞小鼎等^[4]研究证明,弓形回波是由后侧强烈的下沉气流造成。弓形回波有很多形态和类型,包括经典弓形回波、弓形回波复合体、单体弓形回波和炮线型(或线性波形)弓形回波。根据反射率因子和径向速度两种产品相结合能更准确地识别弓形回波。显著弓形回波具有以下特征^[15]:在低层反射率因子图(图 2a)上除了形如弓外,弓形回波前沿存在高的反射率因子梯度,在较强回波带后侧有弱回波通道或者后侧入流缺口。在径向速度图(图 2b)上,对应弱回波通道或者后侧入流缺口存在较大范围的径向速度大值区,或弓形回波突起处及其后侧有较大范围的径向速度大值区。有时在弓形回波主体前部可

生成阵风锋,由于阵风锋所经过的地方常出现雷暴大风,因此,在多普勒雷达业务应用中将其作为研判雷暴大风天气发生与否的标志性指标特征^[4]。

阵风锋在近地层形成,可在 $0.5^\circ\sim 1.5^\circ$ 仰角观测到,多处于强回波的正前方或左前方,在反射率因子图上表现为窄带回波,在 15~25 dBZ,高仰角还未观测到有阵风锋的出现。由于廊坊中北部区域与北京多普勒雷达站距离多在 60 km 以内,杂波较多,相较于 0.5° 仰角,部分时段 1.5° 仰角的回波特征更清楚,但是 1.5° 回波面积范围略有缩小,因此本文选取 0.5° 和 1.5° 仰角回波综合分析阵风锋的识别。

2010—2019 年,廊坊市 5 次典型弓形回波雷暴大风天气过程,共涉及 14 站次,其中有 3 次过程共 7 站次观测到了阵风锋,平均提前量为 36.6 min,最大提前量为 54 min,最小提前量仅为 7 min(表 2)。

2.2.2.2 弓形回波基本径向速度产品特征

根据弓形回波的形成原理,后侧强烈的下沉气流到近地面后向四周扩散形成后侧入流急流使回波演变成弓状,与弓形回波后侧入流急流对应的径向速度大值区可预示近地面大风的形成^[4]。径向速度大值区的速度值与后侧入流急流的强度以及弓形回波与雷达距离等有关。径向速度是锥面上沿着雷达的径向速度,不能等同于实际风速,由于分析的是两个最低仰角(0.5° 和 1.5°)的径向速度,较接近实际风速,可将对应弓形回波后侧的 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 径向速度区域定义为径向速度大值区^[15]。径向速度大值区是弓形回波的重要雷达回波特征,仅根据反射率因子识别弓形回波有时会出现假弓形回波,当几个位于一条弧线上的松散单体合并时形似弓形回波,反射率因子图上无法确认,但是可以同时依据径向速度图上是否存在较大范围的径向速度大值区,或弓形回波突起处及其后侧是否有较大范围的径向速度大值区加以综合判断。

弓形回波基本速度产品的一般特征有两种^[15],一是 0.5° 的 PPI 产品中,出现速度 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的入流速度区域,有时会出现速度模糊,说明径向速度已经很大了,这种特征意味着地面雷暴大风即将出现,并且 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区域或速度模糊区域一般与地面灾害性大风出现范围和落区有较好的一致性。二是出现中气旋特征,即便达不到中气旋标准,只要有 $\geq 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的旋转速度,甚至个别时次的部分仰角上旋转速度可达 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,对应的反射率因子图上常常出现在弓形回波的一端,或者是弓形回波的弓起部分。廊坊 14 站次弓形回波引起的雷暴大风中有 5 站次

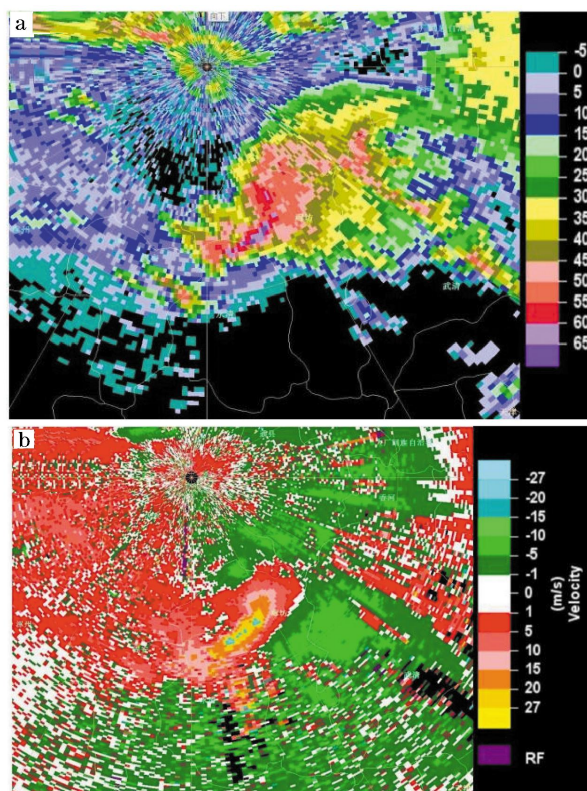


图 2 2020 年 6 月 25 日 21:48 北京多普勒雷达
(a 为 1.5° 仰角反射率因子, b 为 0.5° 仰角径向速度)

表2 廊坊弓形回波雷暴大风多普勒雷达特征指标检验统计

统计项	出现站次 /站次	未出现站 次/站次	出现站次 占比/%	出现时间 提前量最 大值/min	出现时间 提前量中 位数/min	出现时间 提前量最 小值/min	平均时间 提前量 /min
阵风锋	7	7	50	54	36.6	7	42
上游及可能影响区域 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区	14	0	100.0	93	37.1	6	35.5
上游及可能影响区域 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区	13	1	92.9	87	37.1	15	35
中气旋	6	8	42.9	55	18.2	0	12.5
旋转速度 $\geq 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	13	1	92.9	51	26.2	4	23
$VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$	10	4	71.4	155	52.7	18	34.5
发生地 10 km 范围内冰雹指数(HI)	13	1	92.9	65	37.4	0	40
发生地 10 km 范围内龙卷涡旋特征(TVS)	6	8	42.9	35	10.5	0	5.5
发生地 10 km 范围内中气旋(M)	8	6	57.1	83	26.5	0	18.5

注:0表示此项雷达特征指标出现时,灾害性天气已经出现,无提前量。

出现冰雹、7站次出现短时强降水,表明雷暴大风常常出现在弓形回波的顶部和中间突起部分,同时还多伴有冰雹、雷电、强降水等。

从表2可知,2010—2019年廊坊市弓形回波雷暴大风出现前,100%的站次上游及可能影响区域出现 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区,平均提前量为37.1 min。上游及可能影响区域出现 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区、旋转速度 $\geq 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和冰雹指数(HI)的站次均达92.9%,平均提前量分别为37.1、26.3和37.4 min。

2.2.2.3 其他特征指标

2010—2019年廊坊市弓形回波雷暴大风出现前,雷暴大风出现站点10 km范围内 $VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的占比为71.4%(表2),平均预警提前量最高,达到52.7 min;中气旋(M)、龙卷涡旋特征(TVS)产品上有预警提示的站次占比分别为57.1%和42.9%;出现中气旋站次占比达到了42.9%,均高于不分类预警指标检验的平均值。当监测到弓形回波时,结合上游及可能影响区域 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区、阵风锋、 $VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的出现时间、位置,可以提前30~60 min发布雷暴大风预警信号。当出现旋转速度 $\geq 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,甚至出现中气旋时,说明即将或已经出现雷暴大风,预警发布提前量只有10~30 min,甚至更短。

弓形回波雷暴大风过程均具有 VIL 值升到阶段最大值(包括中心最大值和大值区的范围)后骤降特征,所以, $VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 可以作为雷暴大风发布预警重要参考指标, VIL 值升到阶段最大值(包括中心最大值和大值区的范围)后骤降可以作为提前预报地面灾害性大风即将发生的标志。此外,35.7%的

站次出现 VIL 值骤升骤降后再次骤升的现象,根据东高红等^[8]研究, VIL 值快速减小后的突然跃增意味着对应地面灾害性大风已经发生或正在发生。

雷暴大风出现前站点10 km范围内全部出现冰雹指数(HI)预警提示,平均提前量为40 min,灾害性天气出现前3个体扫内冰雹指数(HI)预报冰雹直径平均为4.2 cm,最大为7 cm,最小为2 cm。冰雹指数(HI)、中气旋(M)、卷涡旋特征(TVS)雷达产品的高比例出现也说明弓形回波雷暴大风的强度非常剧烈。

由弓形回波引起的雷暴大风,可提前发布预警的雷达特征指标相对较多,且特征明显,提前量大,依据是反射率因子图上弓形回波的形状,其次是结合径向速度大值区,阵风锋不是总出现,但是出现即可以判断雷暴大风即将发生,灾害性地面大风的落区为弓形回波顶端凸起位置、大风速核的前方、阵风锋后主体回波移动的正前方,综合应用上述雷暴大风多普勒雷达预警特征指标,可以精细化的预报雷暴大风的落区、强度和影响时段等,发布更为精准的灾害性天气预警信号。

2.3 带状回波雷暴大风临近预警指标检验分析

2.3.1 带状回波反射率因子特征

带状回波大多由松散的对流单体合并形成,合并后的回波带成为一个有组织的整体^[9]。2021年6月7日傍晚出现的对流性天气是典型的带状回波(图3a)。2010—2019年廊坊市雷暴大风中由带状回波产生的共45个站,占55.6%,最大反射率因子的平均值为53.3 dBZ,中位数为57 dBZ,最小值为37.5 dBZ。51.1%站次的带状回波雷暴大风出现了阵

风锋,其中 56.5%的站次阵风锋出现在主体回波右前侧(主体回波右半部的前方和主体回波前方右侧),此时主体回波移动方向左右侧有延伸出阵风锋的头尾部,尾部可能会很长,其余出现在主体回波的前方。统计表明,依据带状回波前侧或右前侧阵风锋回波预测雷暴大风的平均提前量可达60.6 min。

2.3.2 带状回波的径向速度特征

产生雷暴大风的带状回波在径向速度图上有明显特征,对应带状回波常常有径向速度大值区(图 3b)。2010—2019 年廊坊市 45 站次的带状回波雷暴大风中,0.5°仰角径向速度图上有 33 站次在灾害性天气上游及可能影响区域有 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区,占 73.3%, $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区有 28 站次,占 62.2%(表 3),带状回波在径向速度图上大风速区的出现即预示着地面灾害性大风的发生。带状回波出现中气旋的比例仅有 11.1%,旋转速度 $\geq 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的站次占 42.2%。统计雷暴大风发生站点与大风速区位置可知,67.6%的雷暴大风发生在带状回波大风

速区域的风速核或极大值区 10 km 范围内,其余雷暴大风出现在大风速区域的边缘或大风速区扫过之后,可依据带状回波径向速度大值区的位置预报即将产生雷暴大风的区域,更加精准的预测灾害落区。

2.3.3 其他特征指标

2010—2019 年廊坊市 $VIL\geq 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 为指标可以预警 20 站次(表 3),占比为 51.3%,平均预警提前量为 37.4 min,在带状回波雷暴大风发生站点及 10 km 范围内,VIL 最大值的平均值只有 $26.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,中位数仅有 $12\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,说明带状回波整体的 VIL 较弓形回波低很多。

带状回波雷暴大风出现前 3 个体扫内,在冰雹指数(HI)产品上,雷暴大风出现站点 10 km 范围内有 25 站次(55.6%)的站点出现预警提示,较雷暴大风出现时间平均提前 39.2 min,预报冰雹直径平均为 3.0 cm,最大为 7 cm,最小为 1 cm,且 2 cm 以下的占比为 48%,5 cm 以上占 16%,明显小于弓形回波雷暴大风天气过程。雷暴大风发生地 10 km 范围

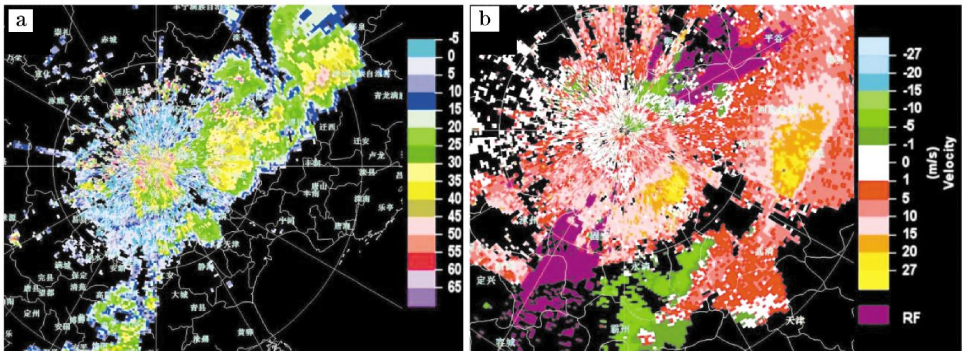


图 3 2021 年 6 月 7 日 18:48 北京多普勒雷达
(a 为 1.5°仰角反射率因子,b 为 0.5°仰角径向速度)

表 3 2010—2019 年廊坊市带状回波雷暴大风多普勒雷达特征指标检验统计

统计项	出现站次 /站次	未出现站次 /站次	出现站次 占比/%	出现时间 提前量最大/min	出现时间 提前量中位数/min	出现时间 提前量最小/min	平均时间 提前量/min
阵风锋	23	22	51.1	117	32	8	60.6
上游及可能影响区域 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区	33	12	73.3	120	44	10	45.4
上游及可能影响区域 $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区	28	17	62.2	95	27.5	0	35.8
中气旋	5	40	11.1	32	22	0	21
旋转速度 $\geq 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	19	26	42.2	53	36	9	33.8
$VIL\geq 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$	20	19	51.3	114	28.5	0	37.4
发生地 10 km 范围内冰雹指数(HI)	25	20	55.6	100	42	6	39.2
发生地 10 km 范围内龙卷涡旋特征(TVS)	3	42	6.7	45	22	12	26.3
发生地 10 km 范围内中气旋(M)	15	30	33.3	32	18	0	18.8

注:0 表示此项雷达特征指标出现时,灾害性天气已经出现,无提前量。

内出现中气旋(M)预警提示的有15站次,占比为33.3%,首次出现较灾害性大风/雷暴大风发生时间的平均提前量为18.8 min;出现龙卷涡旋特征(TVS)预警提示的站点更少,仅有6.7%,对带状回波雷暴大风的预警意义不大。

当出现带状回波需要判断雷暴大风时,可以径向速度图上是否出现 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 径向速度大值区为主要判据,结合反射率因子图上阵风锋和VIL是否出现 $\geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 综合判断发布预警的时间和灾害性大风的落区等。中气旋、中气旋产品(M)和龙卷涡旋特征(TVS)不适宜作为带状回波雷暴大风是否出现的判据。

2.4 块状回波雷暴大风的多普勒雷达特征

2.4.1 块状回波反射率因子特征

个别孤立块状较强单体回波出现超级单体特征时,也可以产生雷暴大风,但持续时间较短,且影响范围较小(图4),直径为10~30 km,持续20~60 min,地面监测和灾情收集较为困难。2010—2019年廊坊市有19站次雷暴大风是由块状回波产生的,占全部雷暴大风的23.5%。块状雷暴大风最大反射率因子值的平均值为58.1 dBZ,比带状回波雷暴大风的平均值高4.8 dBZ,中位数为62.0 dBZ,比弓形回波雷暴大

风的中位数高0.7 dBZ,最小值为37.5 dBZ,要小于另外两种,说明在雷暴大风出现站点10 km范围内,临近体扫的反射率因子值差别较大,有非常强大的超级单体,也有较弱的块状单体回波。

2.4.2 块状回波径向速度特征

0.5°仰角径向速度图上,73.7%的块状回波雷暴大风在灾害性天气上游及可能影响区域有 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区, $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区有12站次,占63.2%(图5),说明块状回波出现时,在径向速度图上 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区可以作为地面灾害性大风的预警指标。仅有2站次块状回波出现中气旋,占10.5%,出现旋转速度 $\geq 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的有7站次,占36.8%。

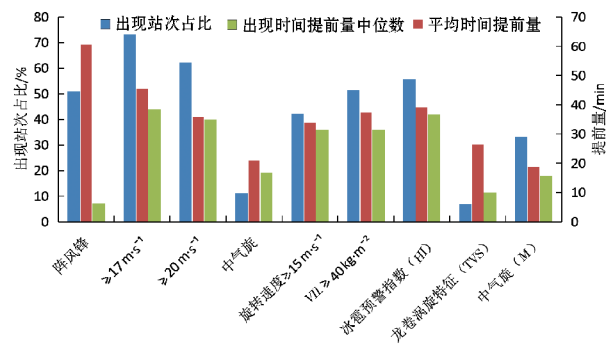


图5 廊坊市雷暴大风几种多普勒雷达特征指标出现比例及预警提前量

2.4.3 其他特征指标

2010—2019年廊坊市VIL $\geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 为指标可以预警11站次,占比为57.9%,平均预警提前量为38.0 min,在块状回波雷暴大风发生站点及10 km范围内,VIL最大值的平均值只有 $25.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,为3类雷暴大风中最低。

89.5%的站次块状回波雷暴大风出现前3个体扫内,在冰雹指数(HI)产品上出现预警提示,较雷暴大风出现时间平均提前43.5 min,预报冰雹直径平均为4.0 cm,最大为8 cm,最小为1 cm,2 cm以下的占比为29.4%,6 cm及以上占23.5%,最多的是3~5 cm,占47.1%。

26.3%的站次出现中气旋(M)预警提示,首次出现时间较灾害发生时间的平均提前量为25.6 min。雷暴大风发生地10 km范围内出现龙卷涡旋特征(TVS)预警提示的站次仅有15.8%,平均提前量只有8.3 min。中气旋、中气旋产品(M)、龙卷涡旋特征(TVS)产品在块状回波雷暴大风出现概率小,且预警提前量小,对预警块状回波雷暴大风意义不大,但

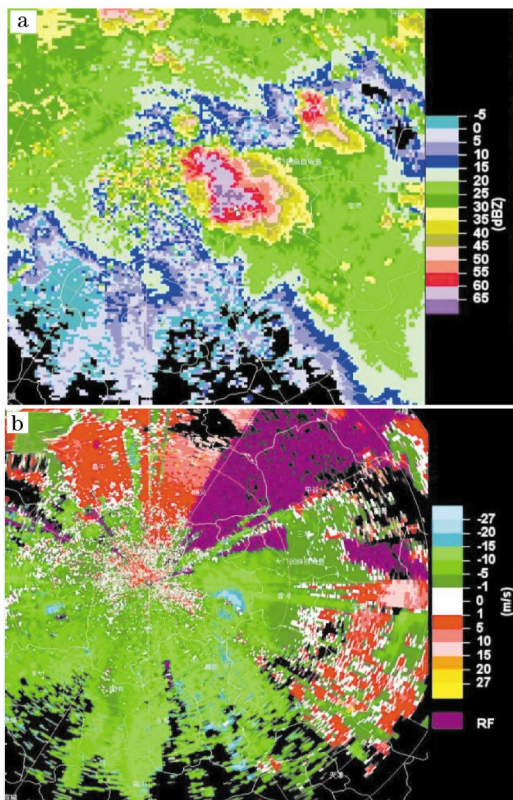


图4 2019年5月17日18:00北京多普勒雷达
(a为组合反射率因子,b为0.5°仰角径向速度)

是这些雷达特征的出现预示着灾害性大风即将发生。

判断块状回波雷暴大风时,以径向速度图上是否出现 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 径向速度大值区为主要判据,结合反射率因子图阵风锋和 VIL 是否出现 $\geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 综合判断发布预警的时间和灾害落区。出现中气旋,或中气旋产品(M)和龙卷涡旋特征(TVS)出现预警提示时,则可以辅助判断雷暴大风即将出现。

除可以准确识别为弓形回波、带状回波和块状回波以外的其他形状的雷达回波,本文暂不作研究。

3 结论

(1)2010—2019 年廊坊市 51.9%的雷暴大风天气出现阵风锋,平均提前量为 36 min,其中 61.0%的雷暴大风出现在主体回波移动前方中部到右侧; 0.5° 仰角径向速度图上,出现 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区的站次占比为 78.2%,以此为指标发布预警的平均提前量为 47.2 min;56.9%的站次垂直液态降水积分总含量 $VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,平均提前量为 41.3 min。

(2)廊坊市弓形回波雷暴大风出现前,100%的站次上游及可能影响区域有 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区,平均提前量为 37.1 min; $VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的占比为 71.4%,平均提前预警时间最高,达到 52.7 min;结合上游及可能影响区域 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风速区、阵风锋、 $VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 出现位置可以提前 30~60 min 发布雷暴大风预警信号。

(3)廊坊市带状回波雷暴大风中有 51.1%的站次出现阵风锋,依据带状回波前侧或右前侧阵风锋回波预测雷暴大风的平均提前量为 60.6 min; 0.5° 仰角径向速度图上有 73.3%的站次在灾害性天气上游及可能影响区域有径向速度 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区,67.6%的雷暴大风发生在带状回波大风速区域的风速核或极大值区 10 km 范围内,依据带状回波径向速度大值区的位置预报即将产生雷暴大风的区域,可更加精准的预测灾害落区。

(4)2010—2019 年廊坊市块状回波雷暴大风中有 57.9%出现阵风锋,54.5%的站次出现在主体回波右前侧; 0.5° 仰角径向速度图上有 73.7%的站次在灾害性天气上游及可能影响区域有 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区,63.2%站次出现 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区;以 $VIL \geq 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 为指标可以预警的有 11 站次,占比 57.9%,平均预警提前量为 38.0 min,可以辅助判断雷暴大风的出现。

(5)中气旋的出现,以及龙卷涡旋特征(TVS)、

中气旋产品(M)上出现预警等在河北省廊坊雷暴大风天气过程中出现的个例较少,其预警指示意义还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 俞小鼎,周小刚,王秀明.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,2012,70(3):311-337.
- [2] 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等.对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J].应用气象学报,2004,15(6):754-766.
- [3] 孙继松,戴建华,何立富,等.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社,2014:13-180.
- [4] 俞小鼎,姚秀平,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:163-169.
- [5] 刁秀广,张新华,朱君鉴.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,2009,37(2):230-233.
- [6] 廖晓农,俞小鼎,王迎春.北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析[J].高原气象,2008,27(6):1350-1362.
- [7] 廖晓农,于波,卢丽华.北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J].气象,2009,35(9):18-28.
- [8] 东高红,吴涛.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,2007,35(6):877-881.
- [9] 王彦,唐熠,赵金霞,等.天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J].气象,2009,35(5):91-96.
- [10] 王彦,唐熠,赵金霞.雷暴大风的新一代天气雷达产品统计特征[C]//第 26 届中国气象学会年会灾害天气事件的预警、预报及防灾减灾分会论文集.杭州:中国气象学会,2009:2214-2219.
- [11] 刘希文,李得勤,韦惠红,等.2013 年湖北地区两次雷暴大风过程环境及雷达回波特征[J].气象与环境学报,2018,34(1):1-10.
- [12] 孙密娜,韩婷婷,王艳春,等.华北一次冷涡背景下飊线雷暴大风成因分析[J].气象科技,2020,48(2):263-273.
- [13] 杨璐,陈明轩,孟金平,等.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,2018,44(6):802-813.
- [14] 杨璐,韩丰,陈明轩,等.基于支持向量机的雷暴大风识别方法[J].应用气象学报,2018,29(6):680-689.
- [15] 龙柯吉,康岚,罗辉,等.四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J].气象,202,46(2):212-222.
- [16] 王福侠,俞小鼎,裴宇杰,等.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,2016,27(3):342-351.
- [17] 杨晓亮,杨敏.2017 年秋季河北一次飊线引发的雷暴大风过程分析[J].气象与环境学报,2020,36(6):1-9.
- [18] 阎访,陈静,卞韬,等.一次雷暴大风的物理环境场和多普勒雷达回波特征[J].气象与环境学报,2013,29(1):33-39.
- [19] 王清川,刘艳杰,周涛,等.河北省廊坊“6·25”超级单体

- 雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(3):54–61.
[20] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会.风力等级:GB/T 28591–2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
[21] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会.强对流天气等级:QX/T 416–2018[S].北京:中国气象局,2018.

Application Analysis of Doppler Radar Characteristics Index Early Warning for Thunderstorm Gale in Langfang City

WANG Hongfeng¹, ZHOU Tao², WANG Qingchuan², GUO Zhiqiang³,
HUANG Haojie², WANG Heting², LIU Qiqi²

- (1. Handan Meteorological Bureau, Handan 056001, China;
2. Langfang Meteorological Bureau, Langfang 065000, China;
3. Baoding Meteorological Bureau, Baoding 071000, China)

Abstract The gust front, high speed value area and other warning indicators were verified and analyzed by using Doppler weather radar in Beijing, Tianjin and Cangzhou during 29 thunderstorm gale weather processes in Langfang city from 2010 to 2019. The results showed that: The gust front appeared in 51.9% of the stations, and 61.0% of the thunderstorms appeared in the center to the right of the main echo moving ahead. The area with high wind speed above $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ on the radial velocity chart of 0.5° elevation angle was taken as the warning index, and the average advance of warning was 47.2 min. There was a high wind speed area above $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the upstream and possibly affected area before 100% bow echo thunderstorms appeared, so the early warning could be issued 37.1 min in advance. The average warning advance amount was the highest, reaching 52.7 min, in the 71.4% thunderstorm wind stations and areas where VIL was above $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ within 10 km of thunderstorm stations. In 73.7% of the massive echo thunderstorms, there were large wind speed areas with radial velocity above $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the upstream and possibly affected areas. Combined with above $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and above $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, gust front, and VIL above $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ in the upstream and possible influence areas, thunderstorm gale warning signals can be issued 30–60 min in advance, and the falling area, occurrence time and intensity of catastrophic gale can be predicted more accurately.

Key words thunderstorm gale; rada echo characteristics; early warning index; gust front; bow echo