Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2025, 14(4), 585-594
Published Online July 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2025.144058

Hans汉斯

2023年7月24日石家庄机场一次强雷暴大风的特征分析

贾肖强

民航河北空管分局，河北 石家庄

收稿日期：2025年5月31日；录用日期：2025年6月28日；发布日期：2025年7月7日

摘　要

本文利用ERA5再分析资料、石家庄机场多普勒天气雷达和石家庄机场周边自动站等资料，对2023年7月24日发生在石家庄机场的一次雷暴大风的环境条件、雷暴回波特征和地面风场的演变进行了分析。结果表明：本次雷暴大风天气发生在弱垂直风切变，强对流有效位能条件下；在径向速度图上较早地观测到了雷暴大风，地面出现了明显的冷池，雷暴大风出现在地面等温线密集带靠近冷池的一侧。

关键词

雷暴大风，冷池，多普勒雷达，Cressman插值

Analysis on the Characteristics of a Strong Thunderstorm with Strong Wind at Shijiazhuang Airport on July 24, 2023

Xiaoqiang Jia

Hebei Branch of North China Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Shijiazhuang Hebei

Received: May 31st, 2025; accepted: Jun. 28th, 2025; published: Jul. 7th, 2025

Abstract

This paper uses ERA5 reanalysis data, Shijiazhuang Airport Doppler weather radar, and automatic stations around Shijiazhuang Airport to analyze the environmental conditions, thunderstorm echo characteristics, and evolution of surface wind fields of a thunderstorm gale that occurred at Shijiazhuang

文章引用: 贾肖强. 2023 年 7 月 24 日石家庄机场一次强雷暴大风的特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 585-594. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144058

Airport on July 24, 2023. The results show that this thunderstorm gale weather occurred under the conditions of weak vertical wind shear and strong convective available potential energy; thunderstorm gales were observed earlier on the radial velocity map, an obvious cold pool appeared on the ground, and thunderstorm gales occurred on the side of the dense isotherm belt near the cold pool.

Keywords

Thunderstorms and Strong Winds, Cold Pools, Doppler Radar, Cressman Interpolation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

雷暴是夏季常见的强对流天气，常伴有短时强降水和短时大风。雷暴大风具有突发性强，局地性强，破坏力强的特点，常造成低空风场的剧烈变化并伴有强的下沉气流，严重影响着航空器的安全运行，是航空气象预报工作的重点和难点。

一直以来，不少学者对雷暴大风的产生机理和特征进行了广泛的研究，取得了许多成果。俞小鼎[1]的研究指出对流风暴的下沉气流到达地面的强辐散及移动风暴的高空水平动量下传、阵风锋的推进和过境、上升气流对低空暖湿气流的抽吸作用是产生雷暴大风的 3 种方式。费海燕等[2]的研究表明在全国范围内按照平均每万平方千米发生的次数排序，华北和华东地区发生强雷暴大风(25 m/s 以上)的次数最多。李姝霞等[3]通过对 2022 年 7 月 25 日河南雷暴大风的天气学成因的分析，得出了结论：对流层中高层有干冷空气侵入，使下沉气流蒸发加强，导致其气温急剧下降，形成地面冷池和小高压。当 1 h 正变压中心≥2.6 hPa，1 h 变温中心下降达 6℃以上，且强对流上下游的 1 h 变压差值≥3.2 hPa 时，1 h 变温≤−4℃的地面冷池附近对应着国家基本气象站和气象观测站分别出现 19~30 m/s 和 25~38 m/s 的大风。王福侠等[4]研究了河北省中南部的 262 个站点的雷暴大风的雷达回波，发现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，径向速度大值区的形成一般早于弓形回波和阵风锋回波，依据径向速度大值区可更早发布雷暴大风预警。刘彬[5]等通过对云南雷暴大风时空分布特征进行统计分析得出结论，大部分物理量在雷暴大风发生前 6 h 均向利于雷暴大风发生的方向变化。

2023 年 7 月 24 日傍晚至夜间石家庄机场区域出现了一次强的雷暴大风过程，本场最大风速达到了 32 m/s，对机场的正常运行及设备设施都造成了巨大的影响。本文利用本场天气雷达资料、自动站资料、本场自观系统资料和 ERA5 再分析数据等资料对此次灾害性大风的天气背景和演变特征进行分析，以积累雷暴大风天气的预报经验。

2. 资料

本文使用的资料包括：空间分辨率为 0.25˚ × 0.25˚、时间分辨率为 1 h 的 ECMWF 第五代全球大气再分析资料(以下简称为 ERA5 再分析资料)、石家庄机场附近的自动站数据资料、石家庄机场的多普勒天气雷达数据、石家庄机场 VASALA 自观系统的数据资料。其中自动站资料的时间分辨率是 5 分钟，气象要素包括了气压、气温、1h 变压、1 小时变温，风向风速等。

3. 天气实况

2023 年 7 月 24 日 18 时~22 时(北京时)石家庄地区、衡水地区、沧州地区和山东西部地区先后出现

了 17 m/s 以上的雷暴大风。根据河北省的自动站资料，石家庄的元氏站的风速最大达到了 30.6 m/s。石家庄机场自动观测系统记录的最大风速是 32.1 m/s，风速等级达到了 11 级。

Table 1. Live winds above 20 m/s on July 24, 2023 (Beijing Time)
表 1. 2023 年 7 月 24 日 20 m/s 以上大风实况(北京时)

时间	地点	极大风风速(m/s)
18:45	石家庄–灵寿县	28.5
18:56	石家庄–井陉县	29.2
19:07	石家庄	23.3
19:09	保定–顺平	22.4
19:12	石家庄–无极	24.0
19:15	石家庄–新乐	25.2
19:20	石家庄–元氏	30.6
20:02	保定–安国	21.2
20:14	保定–安平	22.9
20:18	保定–蠡县	26.5
20:22	衡水–饶阳	28.9
20:31	沧州–肃宁	22.7
20:41	衡水–武强	21.6
21:00	衡水–阜城	21.4

通过表 1 可以看出：7 月 24 日 18 时 45 分石家庄西部的灵寿站最先观测到了 28.5 m/s 的大风，随后在石家庄中东部的站点也陆续观测到了大风。7 月 24 日 20 时以后在保定、衡水和沧州的部分站点也观测到了大风。通过查看临近省市的自动站，大风区从衡水继续向东移动，最终移动到了山东的西部地区，随后风速逐渐减小至 15 m/s 以下。

4. 环境条件分析

7 月 24 日 06 时(UTC) 500 hPa 高空图(图 1(a))在内蒙古东部和黑龙江北部有较深的高空槽存在，并有一个温度槽与之配合。高度槽的南半部分温度为−8℃至−7℃，北半部分等温线较密集，温度从−8℃向北迅速降低至−12℃。从风场上分析，在黑龙江东北部形成了一个闭合的涡旋风场。根据东北冷涡判别标准，在 500 hPa 高空天气图上要至少有一根闭合等高线，并且要有明显的冷槽或冷中心与之相配合。本次天气过程在东北地区未形成闭合的等高线，但风场呈现出了涡旋结构。综合风场和温度场的分析，本次过程与东北冷涡的特征比较相似。在辽宁、渤海和山东一带，有一个较为宽广的高空槽区，河北地区处于槽区后部的西北气流中，河北北部地区高空风速在 12 m/s 至 16 m/s 之间，河北中南部(保定、石家庄、邢台和邯郸地区)高空的风速自北向南逐渐从 8 m/s 减小至 4 m/s，槽后的西北气流风速较小，但仍能引导部分冷空气入侵河北和山东一带。588 位势米等高线穿过江苏、安徽中部和河南南部。从风场上分析，山东中南部和河南处于副高脊线的完全控制中，河北中南部处于槽后冷空气和副高控制区的交界地带，易发生强对流天气。

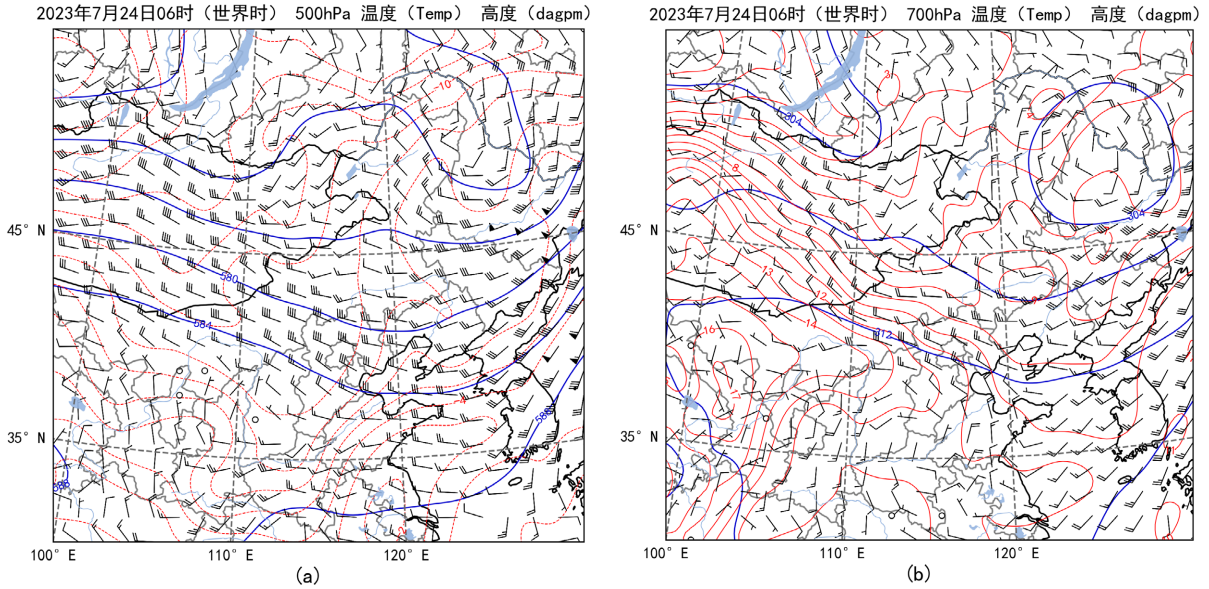
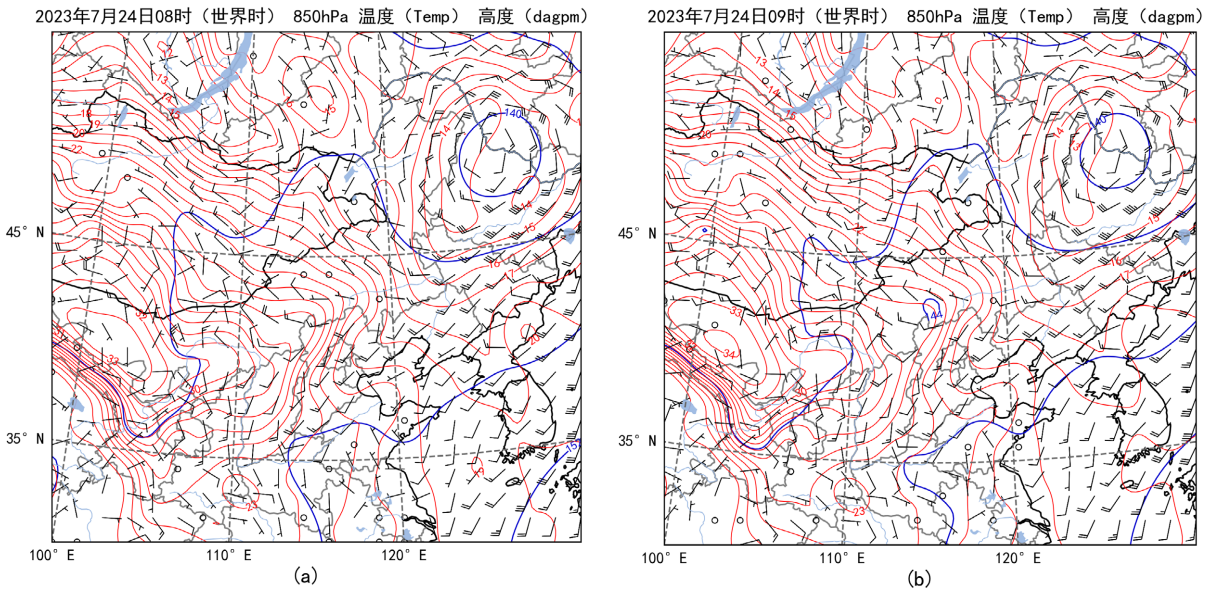


Figure 1. 06:00 on July 24, 2023 (UTC) 500 hPa and 700 hPa altitude diagram (Blue solid line: contour, unit: dagpm, interval: 4 dagpm, red dotted line: isotherm, unit: ˚C, interval: 1˚C)
图 1. 2023 年 7 月 24 日 06 时(UTC) 500 hPa、700 hPa 高空图(蓝色实线：等高线，单位：dagpm，间隔：4 dagpm，红色虚线：等温线，单位：℃，间隔：1℃)

从 7 月 24 日 06 时(UTC) 700 hPa 高空图(图 1(b))可见，在黑龙江的上空可以分析出一条闭合的等高线，在闭合等高线的西北侧有一个 4℃的冷中心。冷中心和等高线中心没有重合，风场沿闭合等高线呈涡旋结构，环流形势呈现出东北冷涡的特征。河北地区处于高空槽后的西北气流中，中南部地区风速较小，只有 2~4 m/s，石家庄、保定位于从河套地区东伸出来的暖温度脊中，环境温度为 12℃。高空干冷的西北气流叠加在石家庄、保定地区的暖脊上，位势不稳定层结增强，有利于强对流天气的出现。

分析 7 月 24 日 08~11 时(UTC) 850 hPa 高空图(图 2)的演变可知，在黑龙江的北部始终存在一个闭合涡旋，冷中心的位于低压中心的西北侧。从风场上分析，在承德、北京和保定西北部存在着一个西南－东北走向的切变线，石家庄机场位于切变线南侧的西南气流中，风速 4~6 m/s。从温度场上分析，冷涡西南侧的



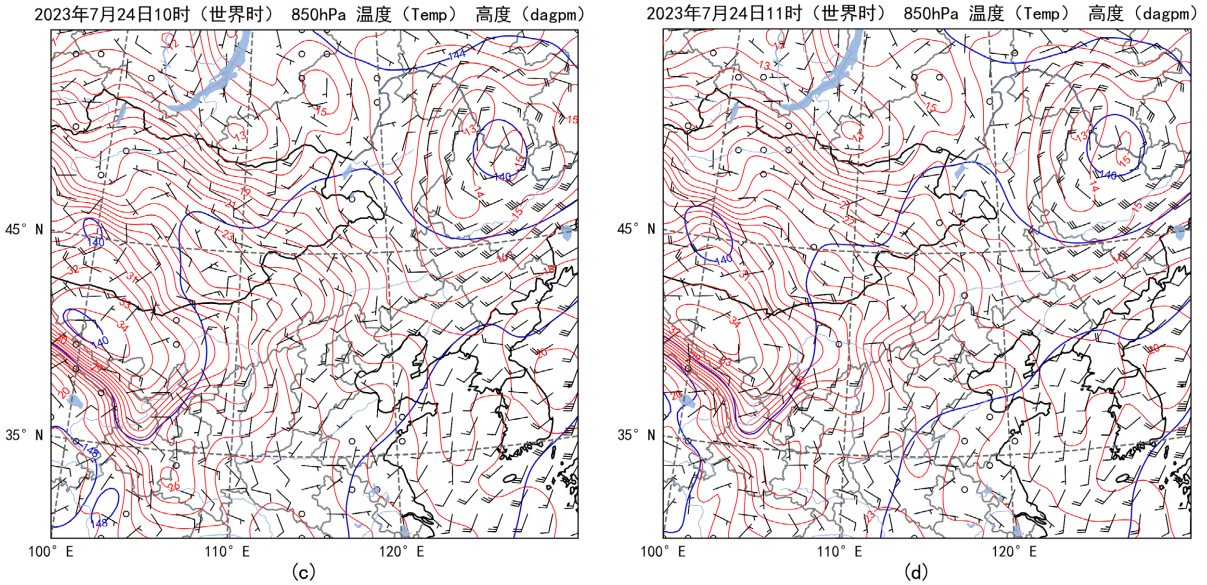


Figure 2. 08~11:00 (ad) (UTC) 850 hPa altitude diagram (Blue solid line: contour, unit: dagpm, interval: 4 dagpm, red dotted line: isotherm, unit: ˚C, interval: 1˚C)
图 2. 2023 年 7 月 24 日 08~11 时(a)~(d) (UTC) 850 hPa 高空图(蓝色实线：等高线，单位：dagpm，间隔：4 dagpm，红色虚线：等温线，单位：℃，间隔：1℃)

温度槽从吉林经辽宁西北部、天津伸到河北石家庄地区，并且 09 时(UTC) (图 2(c))后温度槽进一步加深，河北地区上空的气温均下降 1℃~2℃，说明此时有较弱的冷空气自冷涡中心西南渗透。

本文选取了 ERA5 再分析资料中距离石家庄机场最近的四个网格点，将四个网格点的各层气象要素通过双线性插值的方法插值到石家庄机场，然后根据插值后的各层气象要素的值，绘制出了石家庄机场的 TlogP 图(图 3)。从石家庄机场 24 日 06 时(UTC) (图 3(a))和 09 时(UTC) (图 3(b)) TlogP 图可见，0~6 km、0~3 km 风切变分别为 7 m/s、1.5 m/s 和 6.6 m/s、0.6 m/s，垂直风切变较小。本次雷暴大风过程是一次弱的垂直风切变环境发生的强对流天气，这与经典雷暴大风的强垂直风切变的环境特征有很大不同。

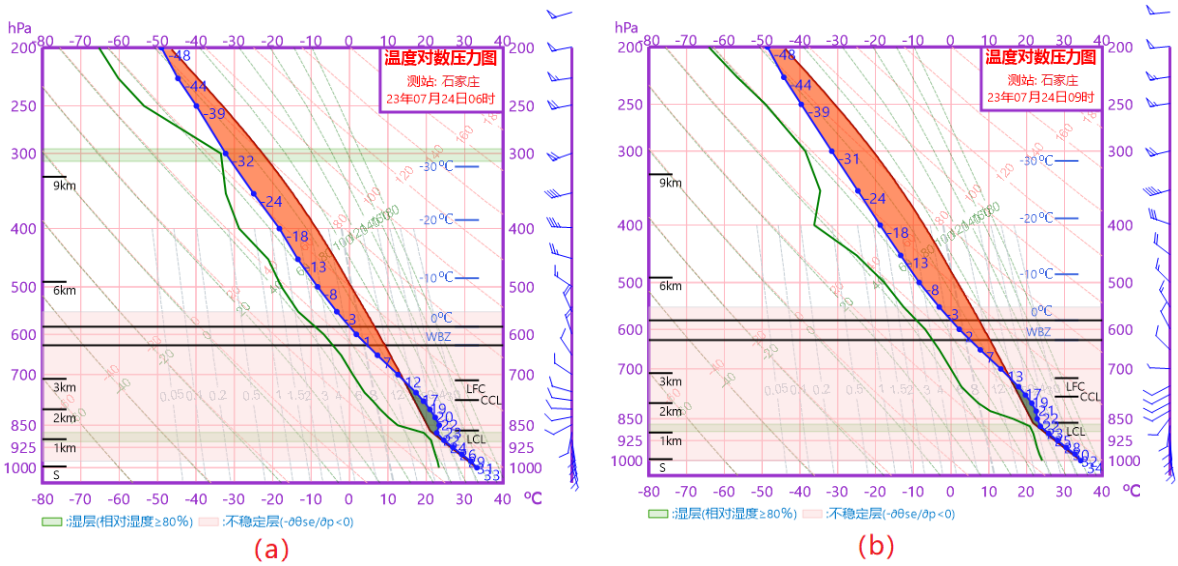


Figure 3. 06:00 (a) and 09:00 (b) (UTC) Shijiazhuang Airport ERA5 reanalysis data TlogP diagram on July 24, 2023
图 3. 2023 年 7 月 24 日 06 时(a)和 09 时(b) (UTC)石家庄机场 ERA5 再分析资料 TlogP 图

24 日 06 时(UTC)的对流有效位能(CAPE)高达 2737.6 J/kg，09 时(UTC)对流有效位能进一步增长到了 3338.3 J/kg，石家庄机场上空累积了巨大的不稳定能量，为强对流天气的发生提供了有利的条件。

7 月 24 日 06 时(UTC)和 09 时(UTC) 850 hPa 与 500 hPa 温差较大，分别达到了 31.7℃和 31.2℃。从露点的廓线还可以发现，在 925 hPa 至 850 hPa 之间有湿层，850 hPa 以上湿度较小，尤其在 400 hPa 附近有一个显著的干区。在 925 hPa 以下，湿度又开始显著减小，形成了“下喇叭口”的干下击暴流形态。从温度廓线的分布来看，在 850 hPa 的温度直减率接近于干绝热直减率，对于雷暴大风的产生很有利。

综合上述分析，本次雷暴大风发生于弱的东北冷涡背景下，华北平原处于高空槽后的西北气流中。环境垂直风切变较弱，500 hPa 风速较小，对流有效位能较大，露点廓线在低层有明显的“下喇叭口”的干下击暴流形态。

5. 雷达特征分析

5.1. 反射率因子图特征

24 日 07:00 (UTC)在石家庄机场西北方向 100 km 处的山区开始出现对流单体，07:20 (UTC)在石家庄机场西南方向 90~120 km 处的阳泉山区附近也开始出现对流单体。截止到 08:36 (UTC)前，上述两处位置的对流回波一直在山区上空生成和消散，强度和位置变化不大。此时的雷暴回波是山区的热对流为主，所以没有明显的移动方向。08:36 (UTC)至 10:04 (UTC)之间，西北方向 120 km 至 150 km 处的强回波开始增多，并快速的向石家庄机场方向移动。同时机场西南侧的强回波已经移动到机场西侧 90 km 至 120 km 处，并与西北侧强的带状回波合并，在机场的 270 度至 360 度的范围形成了一条宽约 30 km 的强回波带，回波带距离机场最近约 40 km (图略)。

10:04 (UTC)石家庄机场西北方向形成了一个宽广的带状回波，回波带中有多个强回波单体，强回波单体最大反射率因子为 50~55 dBZ (图 4(a))。10:37 (UTC)在石家庄机场西北方向 30~50 km 处形成了一个强的 35 dBZ 以上回波体，回波体的北部反射率因子较高，达到了 50~55 dBZ，南部反射率因子较低，为 35~45 dBZ。此时回波体的形状较为规则，类似一个矩形，没有发现弓状回波的特征(图 4(b))。

10:46 (UTC)西北方向的强回波体形状发生变化，强回波体的南半部分(红色椭圆的区域)呈现出弓形的形状，这种弓形回波常会引起强的雷暴大风(图 4(c))，此时弓形回波距离本机场约 10 km。10:55 (UTC)弓形回波到达本机场，回波的弓状结构更加明显。根据石家庄机场自观系统的数据，在 10:55 (UTC)时刻，本场的风速骤然加大到了 10 m/s 以上，并在 11:07 (UTC)记录到了本次雷暴大风过程的最大风速 32.1 m/s。

通过对反射率因子强度图的分析可以发现，在本机场的雷暴大风出现前，进近区域已经出现了带状回波，并快速向本机场移动。在此次雷暴过程中，带状回波移动到本机场 10 km 附近才呈现出弓形回波的结构，并且也没有观测到阵风锋，因此仅通过强度图对雷暴大风进行临近预警提前量较小，把握性不足。本场多普勒雷达在此次过程中体扫模式的最低仰角为 1.5 度，也影响了阵风锋回波的识别率，对于雷暴大风的识别也是不利因素。

7 月 24 日 06 时(UTC) 500 hPa 高空图(图 1(a))在内蒙古东部和黑龙江北部有较深的高空槽存在，并有一个温度槽与之配合。高度槽的南半部分温度为−8℃至−7℃，北半部分等温线较密集，温度从−8℃向北迅速降低至−12℃。从风场上分析，在黑龙江东北部形成了一个闭合的涡旋风场。根据东北冷涡判别标准，在 500 hPa 高空天气图上要至少有一根闭合等高线，并且要有明显的冷槽或冷中心与之相配合。本次天气过程在东北地区未形成闭合的等高线，但风场呈现出了涡旋结构。综合风场和温度场的分析，本次过程与东北冷涡的特征比较相似。在辽宁、渤海和山东一带，有一个较为宽广的高空槽区，河北地区处于槽区后部的西北气流中，河北北部地区高空风速在 12 m/s 至 16 m/s 之间，河北中南部(保定、石家庄、

邢台和邯郸地区)高空的风速自北向南逐渐从 8 m/s 减小至 4 m/s，槽后的西北气流风速较小，但仍能引导部分冷空气入侵河北和山东一带。588 位势米等高线穿过江苏、安徽中部和河南南部。从风场上分析，山东中南部和河南处于副高脊线的完全控制中，河北中南部处于槽后冷空气和副高控制区的交界地带，易发生强对流天气。

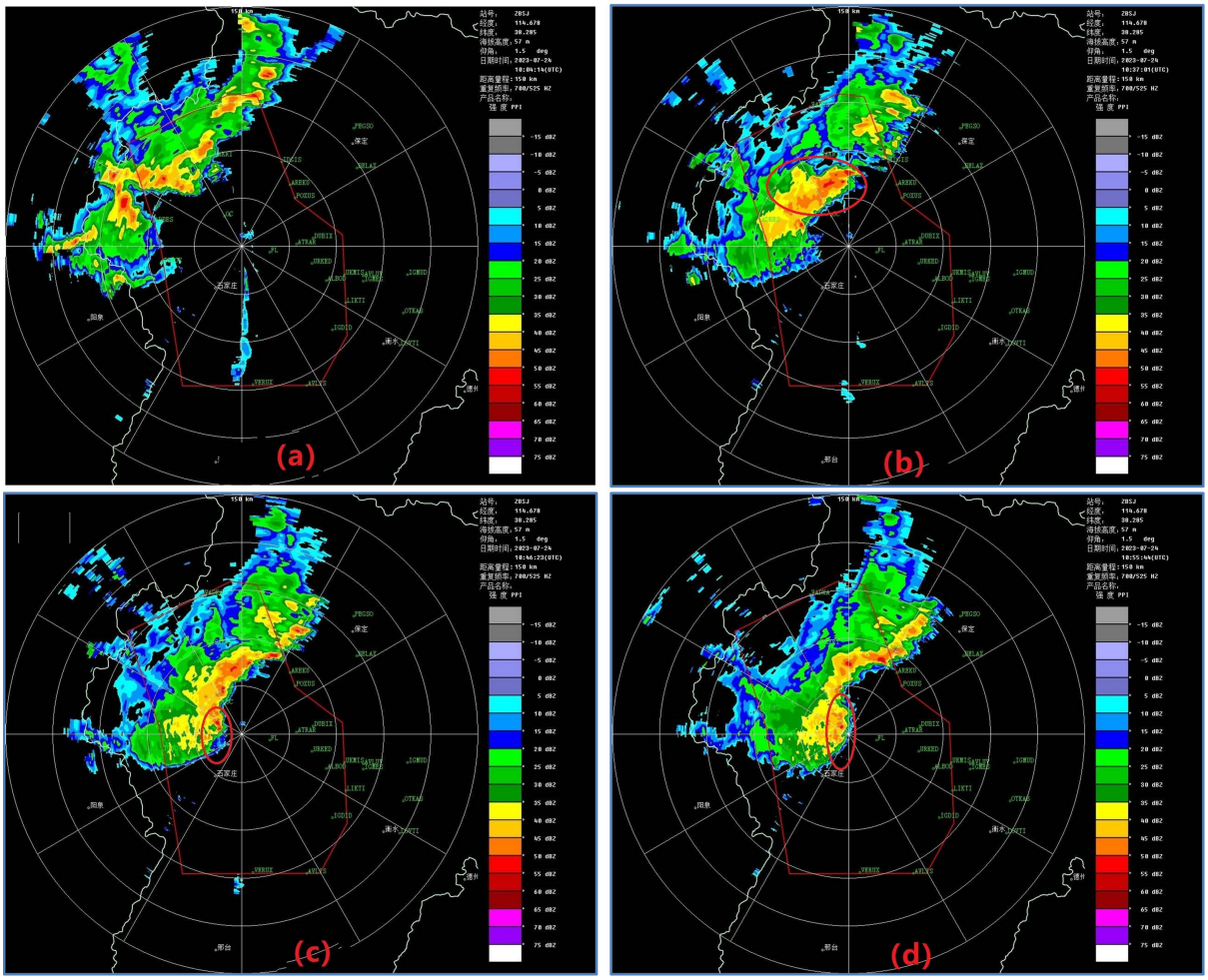


Figure 4. 1.5 degree elevation reflectivity factor graph of Doppler weather radar at Shijiazhuang Airport on July 24, 2023 ((a) 10:04, (b) 10:37, (c) 10:46, (d) 10:55 (UTC))
图 4. 2023 年 7 月 24 日石家庄机场多普勒天气雷达 1.5 度仰角反射率因子图((a) 10:04, (b) 10:37, (c) 10:46, (d) 10:55 (UTC))

5.2. 径向速度图特征

从径向速度图上可以看出，10:04 (UTC)在石家庄机场西北方向 50~60 km 处，径向速度图上出现了大于 17 m/s 的大风区(图 5(a))，方向为朝向机场方向，高度为 1400 m，此大风区与同时刻的反射率因子图上的强回波相对应。

10:37 (UTC)大风区在本机场西北方向移动发展，距离为 27.5 km，高度 760 m，最大风速超过 25 m/s (图 5(b))，并且一小部分区域出现了速度模糊。通过对径向速度图的连续监测，可以估算出大风区相对于本机场的径向移动速度约为每小时 40 km。

10:46 (UTC)在本场西北方向 17.5 km 处，出现了较大范围的速度模糊(图 5(c))，可以估算出此区域的

最大风速超过了 32 m/s，并且在西北方向 15 km 至 40 km 范围内，均出现了超过 17 m/s 的大风区。通过与反射率因子图进行对比，此时雷暴的强回波(超过 35 dBZ)距离本场最近为 13 km。速度图上的大风区距离本场更近，在 10 km 处观测到有 17 m/s 的大风区，高度为 280 m。10:55 (UTC)在速度图上，大风区已经移动到本场上空(图 5(d))，此时速度模糊仍然存在。通过对比本场的自观资料，本场大风的时间与径向速度图上大风区到达本场的时间一致。

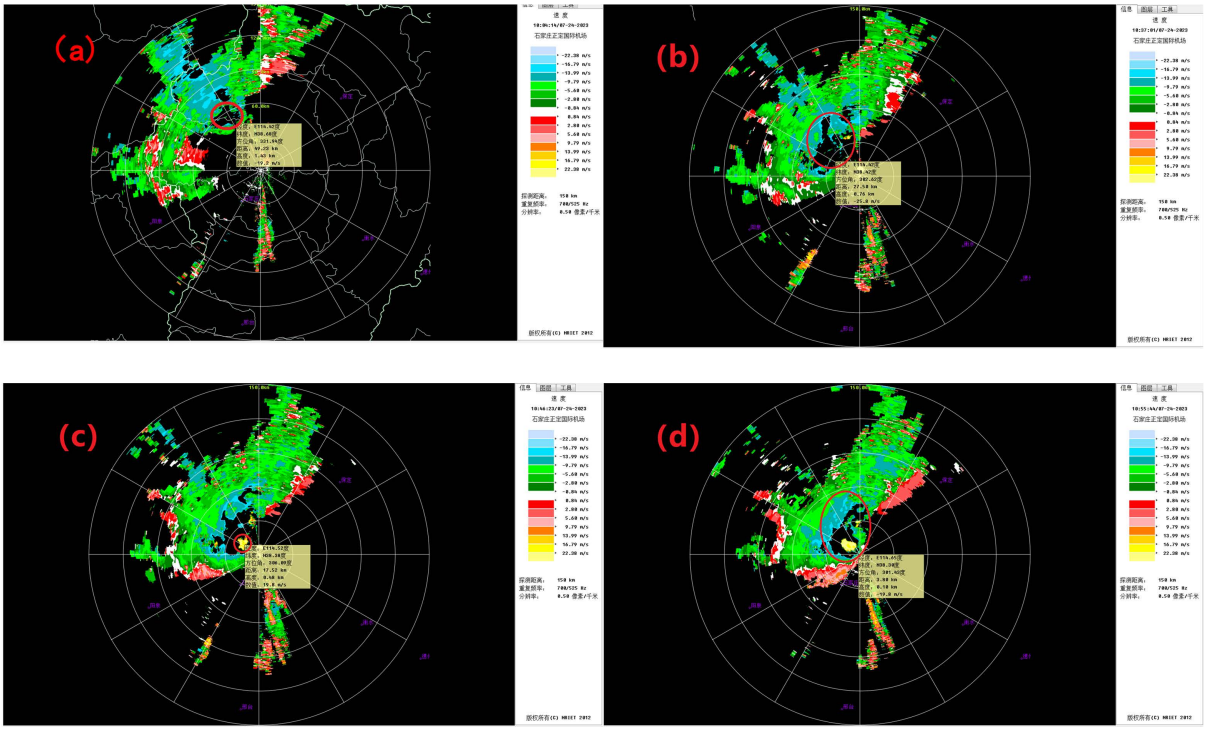


Figure 5. 1.5 degree elevation radial velocity diagram of Doppler weather radar at Shijiazhuang Airport on July 24, 2023 ((a) 10:04, (b) 10:37, (c) 10:46, (d) 10:55 (UTC))
图 5. 2023 年 7 月 24 日石家庄机场多普勒天气雷达 1.5 度仰角径向速度图((a) 10:04, (b) 10:37, (c) 10:46, (d) 10:55 (UTC))

通过上述分析可以看出，本次雷暴大风天气在径向速度图上较早地出现了大风区，并且大风区与反射率因子图上强回波区移动较为一致，大风区的范围比强回波区的范围更大一些，因此在日常的雷雨保障工作中，要加强对径向速度图的监测和利用，综合分析强度图和径向速度图来共同确定危险天气的影响区域。

6. 自动站资料分析

图 6 是石家庄机场附近自动气象站的风场和温度场的叠加图，自动气象站选取范围是东经 113.5 度至 116.5 度，北纬 37 度至 40 度。本文将 5 分钟级的自动站观测到的风和温度数据，通过 Cressman 插值的方法，插值成 0.1 度*0.1 度的格点资料，将风场和温度场进行叠加，最后得到了石家庄机场附近风场和温度场的格点图。

10:35 (UTC)在石家庄地区有一条地面风场辐合线(图 6(a))，石家庄机场处于辐合线的中心位置，机场东南方向为东南风，机场西北方向为风速较大的西北风，通过对比实况雷达强度图和径向速度图可以得出，机场西北方向的大风区为本次雷暴所引起的地面大风。10:45 (UTC)地面风场辐合线向东南方向移动，辐合线西北侧的地面风速明显加大，地面大风区内有等温线的密集带(图 6(b))，结合雷达图可以判断出，辐合线西北侧的大风区内形成了冷池，冷池中心的最低变温为−4℃至−10℃。

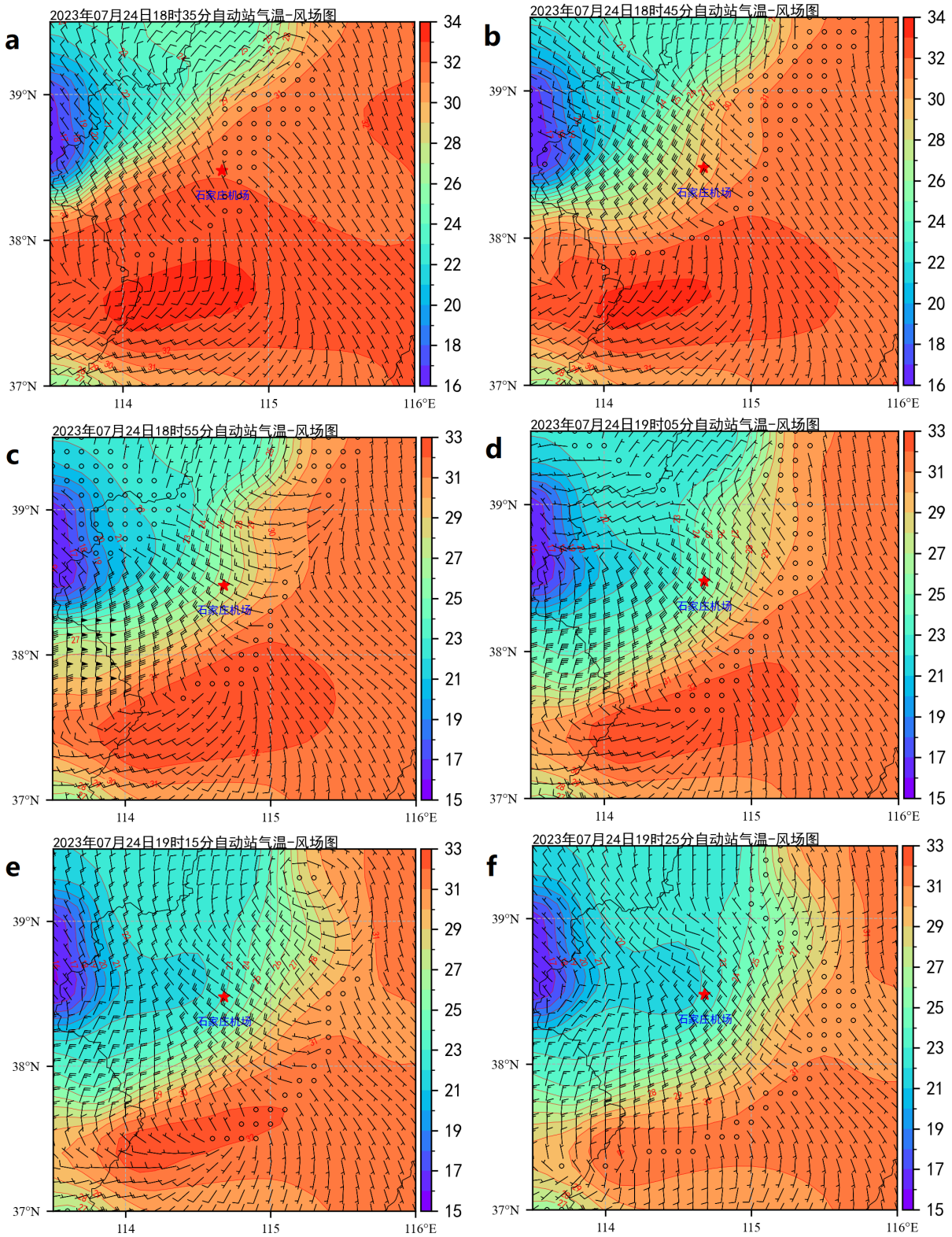


Figure 6. Wind and temperature field diagrams of automatic station surrounding Shijiazhuang Airport on July 24, 2023 ((a) 10:35, (b) 10:45, (c) 10:55, (d) 11:05, (e) 11:15, (f) 11:25, (UTC))

图 6. 2023 年 7 月 24 日石家庄机场周边自动站风场和温度场图((a) 10:35, (b) 10:45, (c) 10:55, (d) 11:05, (e) 11:15, (f) 11:25, (UTC))

10:55 (UTC)地面辐合线继续向东南方向移动(图 6(c))，地面冷池与大风区随之向东南方向移动，同时本机场的自观系统记录到了 10 m/s 以上的大风。11:05 (UTC)至 11:25 (UTC)，地面冷池向东南方向移动，本机场气温由 27℃迅速降低至 22℃ (图 6(d)~(f))。根据本场的自观数据，11:00 (UTC)~11:28 (UTC)本场出现了雷暴大风，平均风速最大 23 m/s，阵风 32 m/s。

通过对自动站资料的分析可以得出，本场雷暴大风发生前，地面风场有明显的辐合线。伴随着雷暴大风的移动，辐合线由西北向东南推进。雷暴大风区对应着等温线密集带，等温线密集带后部是雷暴引起的地面冷池，冷池中心最低变温达到−10℃，雷暴大风出现在等温线密集带靠近冷池的一侧。

7. 结论

通过对 2023 年 7 月 24 日石家庄机场的雷暴大风过程的环境条件、雷暴回波和自动站资料进行分析，发现本次雷暴大风具有以下特征：

本次雷暴大风发生于东北冷涡后部的西北气流中，500 hPa 风速较小，环境垂直风切变较弱，冷空气不明显，对流有效位能较大，露点廓线在低层有“下喇叭口”的干下击暴流形态。

在强度图上，没有观测到阵风锋回波，观测到了弓形回波，弓形回波出现的时间偏晚，强回波距离本场 10 km 处，才呈现出明显的弓形回波特征。在径向速度图上较早地观测到了径向大风区，利用径向速度图可以对大风区的移动和位置进行较好的监测，在以后的业务保障工作中，要加强对径向速度图的运用。

通过对自动站资料的分析发现，雷暴大风发生前地面风场有明显的辐合线，辐合线的位置伴随雷暴大风的移动而变化；辐合线后部是等温线密集带，等温线密集带后部是雷暴引起的地面冷池，雷暴大风出现在等温线密集带靠近冷池一侧的区域。

致　谢

感谢气象台及科室领导对于本文章的数据获取提供了帮助。

参考文献

[1] 俞小鼎. 强对流天气临近预报[M]. 北京: 中国气象局培训中心, 2011: 4-7, 55-59.

[2] 费海燕, 王秀明, 周小刚, 等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12): 1513-1521.

[3] 李姝霞, 冀翠华, 朱斌, 等. 2022 年河南“7.25”雷暴大风天气成因分析[J]. 气象与环境科学, 2023, 46(4): 49-58.

[4] 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.

[5] 刘彬, 邹灵宇, 李晓鹏, 等. 云南雷暴大风天气的环境条件特征分析[J]. 气象, 2022, 48(11): 1402-1417.