

# 天津机场一次阵风锋触发暖区对流过程分析

李楠

中国民用航空华北地区空中交通管理局天津分局, 天津

收稿日期: 2026年2月4日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月10日

## 摘要

本文利用Micaps4.8常规观测资料、天津市气象局自动站以及多种雷达探测数据, 针对2025年6月18日天津一次阵风锋触发暖区对流过程进行天气形势和物理量诊断分析, 并讨论其触发机制及未来如何提升预警效果。结果发现: (1) 本次过程是在高空冷涡槽底和低层西南暖湿气流大尺度背景下引起的, 上干冷下暖湿提供了强对流的基础条件; (2) 较大的对流有效位能和850 hPa与500 hPa的温度差提供层结不稳定的环境条件; 低层水汽较好, 也为短时强降水提供了水汽条件; (3) 雷暴高压内强辐散气流与环境空气形成的阵风锋, 具有较强的抬升触发能力; 阵风锋是低层大气现象, 需要应用低仰角的雷达资料来识别。 (4) 阵风锋过境时伴有气象要素的剧烈变化, 期间需要加强天气监测并做好风向转变服务。

## 关键词

阵风锋, 地面边界, 雷达特征, 气象要素演变特征

# Analysis of a Warm-Sector Convection Event Triggered by a Gust Front at Tianjin Airport

Nan Li

Tianjin Branch of North China Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Tianjin

Received: February 4, 2026; accepted: March 2, 2026; published: March 10, 2026

## Abstract

This paper uses Micaps4.8 conventional observation data, automatic station data from Tianjin Meteorological Bureau, and various types of radar detection data to conduct a diagnostic analysis of the synoptic situation and physical parameters of a warm-sector convection event triggered by a gust front in Tianjin on June 18, 2025. It also discusses the triggering mechanism of the event and approaches to improve early warning effectiveness in the future. The results show that: (1) This event occurred under the large-scale background of the bottom of an upper-level cold vortex trough

and low-level southwest warm and humid airflows; the upper dry-cold and lower warm-humid stratification provided the basic conditions for severe convection. (2) Substantial convective available potential energy (CAPE) and the temperature difference between 850 hPa and 500 hPa supplied the environmental conditions of stratification instability; favorable low-level water vapor also provided the moisture conditions for short-duration heavy precipitation. (3) The gust front formed by the interaction between strong divergent airflows within the thunderstorm high and ambient air had a strong lifting and triggering capacity; as a low-level atmospheric phenomenon, the gust front needs to be identified using radar data at low elevation angles. (4) The passage of the gust front was accompanied by drastic changes in meteorological elements, during which it is necessary to strengthen weather monitoring and provide quality services related to wind direction shifts.

## Keywords

Gust Front, Surface Boundary, Radar Characteristics, Evolution Characteristics of Meteorological Elements

Copyright © 2026 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

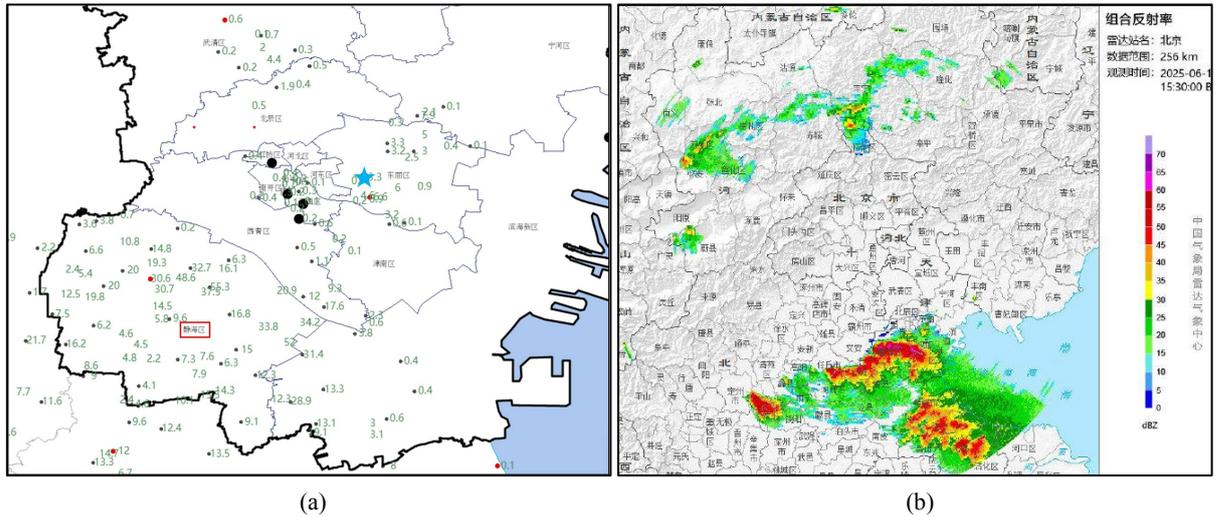
一般来说,雷暴的触发机制主要是地面边界、地形抬升作用。地面边界主要是指不同气团间的界面,包含了锋面、切变线、干线、阵风锋、海陆锋等。阵风锋,也称雷暴出流边界或外流边(低层浅薄的辐合区),是常见的对流触发条件之一,尤其是暖季雷暴多发期,阵风锋与对流系统的加强和减弱也有密切关系[1]。对流风暴中由降水导致的下沉气流将环境较干的空气夹卷进去,致使降水粒子因蒸发或升华剧烈降温,进而导致雷暴内下沉气流温度远低于环境温度,落地时形成冷池,冷池向四周流出的强烈出流的前缘就是阵风锋[2]。张涛等[3]研究发现随着雷暴高压的移动和增强,阵风锋向前移动和增强,当雷暴高压减弱,阵风锋也逐渐消亡。温度梯度与气压梯度越大,瞬时大风越强,阵风锋也越强。郑丽娜等[4]的研究指出阵风锋的维持主要依靠风暴持续的下沉气流,下沉气流减弱后阵风锋会随之减弱。何娜等[5]通过对北京地区阵风锋过程统计分析,结果表明阵风锋触发对流新生的环境场中,大部分个例中高层有干冷平流、低层有暖湿平流,垂直方向上的静力不稳定较强,大部分新生的对流出现在低层风向切变或风速辐合以及高CAPE地区。

阵风锋的识别和预报可以通过多种雷达产品及卫星云图进行锁定和外推。席宝珠等[6]总结了我国学者对阵风锋所开展的相关研究,统计表明利用雷达强度和径向速度回波特征,可以识别阵风锋的位置和范围,并对其外推做出预报,同时配合可见光云图上呈现的中尺度对流云团和弧状云线的变化,结合地面中尺度观测网资料,可以综合识别阵风锋的形成、发展和消散。胡文东等[7]通过对一次阵风锋过程进行雷达气象学诊断分析后发现在天气背景分析基础上,利用雷达资料关注阵风锋初生、发展、运动情况,有望提前1小时左右发现触发新生对流征兆;通过雷达资料可准确掌握阵风锋细致变化、形成近地层急流、下击暴流以及新生对流的发展,是监测强对流触发与预警的关键手段。

本文利用MICAPS常规气象观测资料、天津市气象局一体化平台资料和多普勒雷达等,对天津机场2025年6月18日的一次阵风锋触发对流天气过程的环流形势、环境场特征、雷达回波特征、气象要素演变等进行诊断分析,并与2024年5月30日阵风锋过程进行对比,为阵风锋的监测预警提供参考,探讨其在实际航空气象预报业务及天气服务中的难点,以期进一步提升预警服务水平。

## 2. 天气实况

2025年6月18日15:25~16:46(本文时间为北京时)天津机场发生了一次阵风锋触发的暖区对流过程, 给本场带来雷暴大风和短时强降水天气, 天津静海局地有冰雹出现, 本场中雨持续时间19 min, 过程累计降水量5.8 mm, 偏南大风(瞬时风速  $\geq 17$  m/s)持续21 min, 最大瞬时风速20 m/s(图1, 表1)。



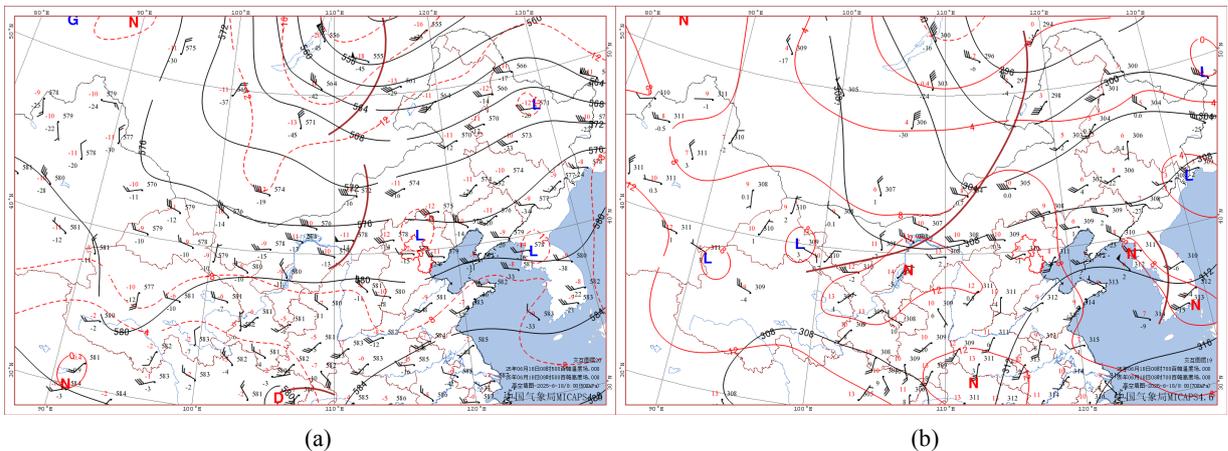
**Figure 1.** (a) 3-hour accumulated precipitation from meteorological bureau automatic stations (★ for the airport location), (b) national radar composite image at 15:30 on June 18

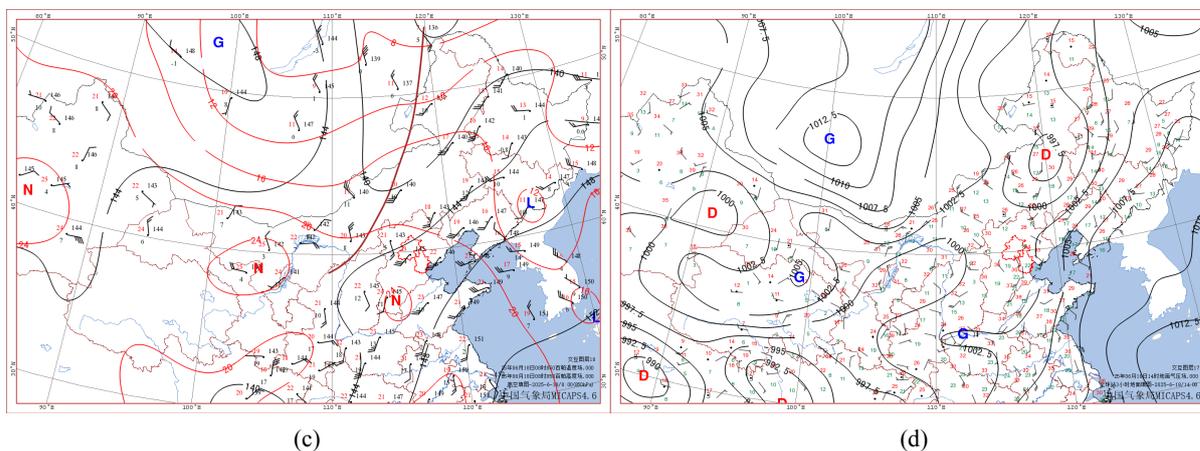
**图 1.** 6月18日: (a) 气象局自动站3小时累计降水量(★为机场位置)、(b) 15:30 全国雷达拼图

**Table 1.** Evolution of the observation summary column  
**表 1.** 观测纪要栏演变

观测纪要栏演变
-SHRA07:47-SHRA08:04-SHRA08:23-08:46
GA07:25-07:46 20(07:25)170
TS07:57SW-08:46NW

## 3. 大尺度环流背景



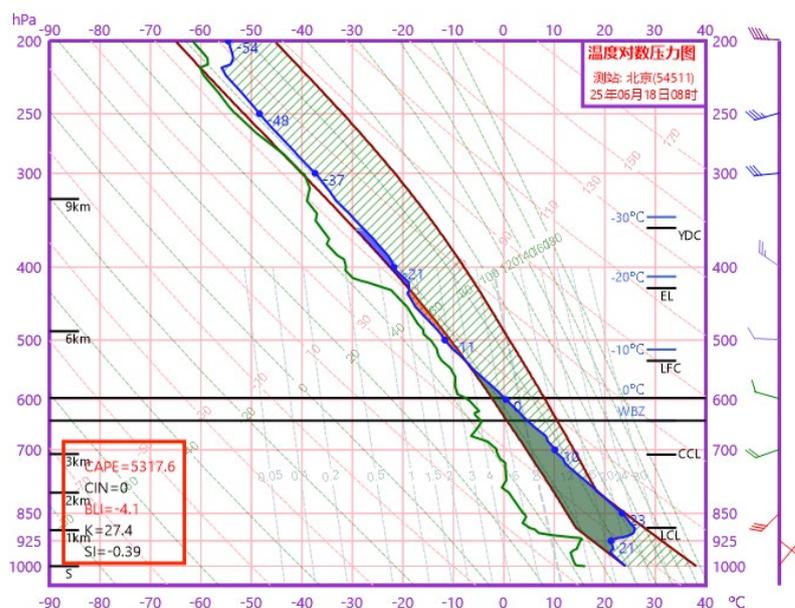


**Figure 2.** The circulation situation of 08:00 on June 18: (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) surface at 14:00  
**图 2.** 6月18日08时: (a) 500 hPa、(b) 700 hPa、(c) 850 hPa、14时 (d) 地面环流形势

08时高空实况和14时地面实况(图2)显示上游贝加尔湖地区的高空冷涡逐渐发展,天津处于冷涡底部偏西气流中,冷涡缓慢东移南压,中低层均为西南暖湿气流,850 hPa达急流强度,来自南海、印度洋及孟加拉湾的暖湿气流一路北上,形成较为明显的上干冷下暖湿的不稳定层结,高空槽整体呈前倾结构,有强对流基础背景条件,模式场分析500 hPa、700 hPa、850 hPa上的槽分别在19日08时、14时、23时前后过境,所以夜间降水过程原本是当日关注重点,预计雨带将从西北方向南下影响天津,但夜间实况显示随着引导气流的改变,冷涡转向东移导致夜间降水空报。

## 4. 环境场特征

### 4.1. 探空分析



**Figure 3.** June 18, 08:00 (corrected) sounding of Beijing Station  
**图 3.** 6月18日08时北京站探空图(订正)

6月18日北京站08时探空订正前(图略)显示能量条件较差,对流有效位能(以下简称CAPE)仅为66.7

J/kg，且低空的对流抑制(以下简称 CIN)较大、自由对流高度(以下简称 LFC)较高。露点对不稳定能量的作用更显著，根据统计温度每升高 1℃，CAPE 值可增加约 200 J/kg，而露点每升高 1℃，CAPE 可增加约 400 J/kg。根据午后的温度和露点对 08 时实况探空进行订正后(图 3)，可以看出随着温度和露点的升高，CAPE 增大至 5317.6 J/kg、CIN 消失；与 14 时实况探空(图 4)进行对比，14 时 CAPE 为 2000.4 J/kg、无 CIN，且 LFC 明显降低，可以看出能量有明显积累过程。同时当天午后最高温度达 38℃接近对流温度，对流触发前露点维持在 21℃~22℃，由于天津位于高空冷涡底部，低层有偏南暖湿气流补充，形成较为明显的“上干冷、下暖湿”的不稳定层结(850 hPa 与 500 hPa 的温差大于 35℃)，在这样的暖区高能背景下，只要有一定的扰动，就有可能触发对流天气，不利因素是垂直风切变强度较弱，不利于对流组织化，对流持续时间不长。

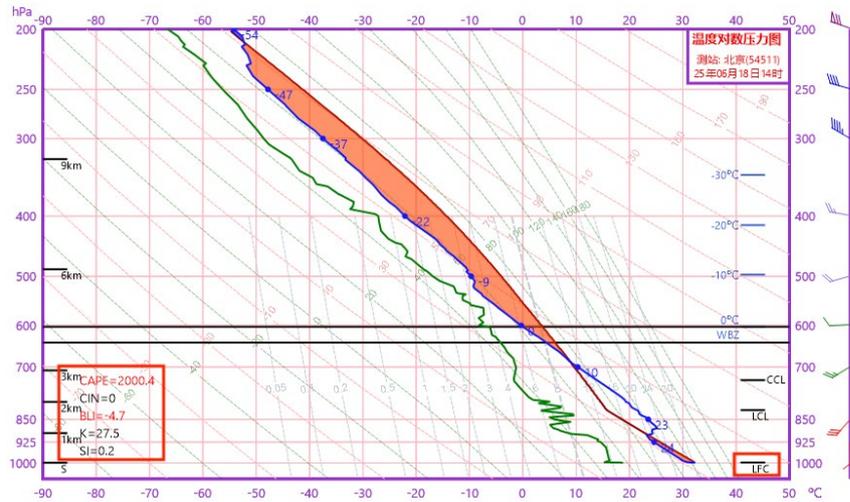


Figure 4. June 18 14:00 sounding of Beijing Station  
图 4. 6 月 18 日 14 时北京站探空

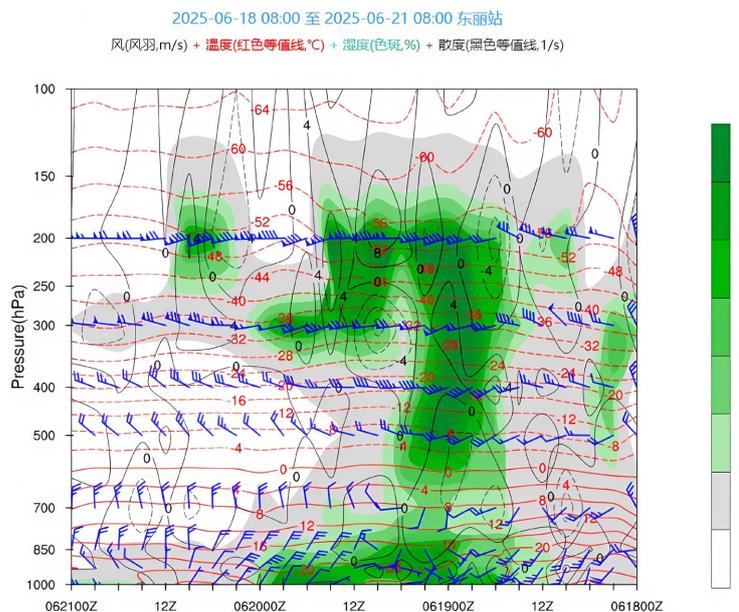


Figure 5. Vertical cross-section of relative humidity at Dongli Station  
图 5. 东丽站相对湿度垂直剖面图

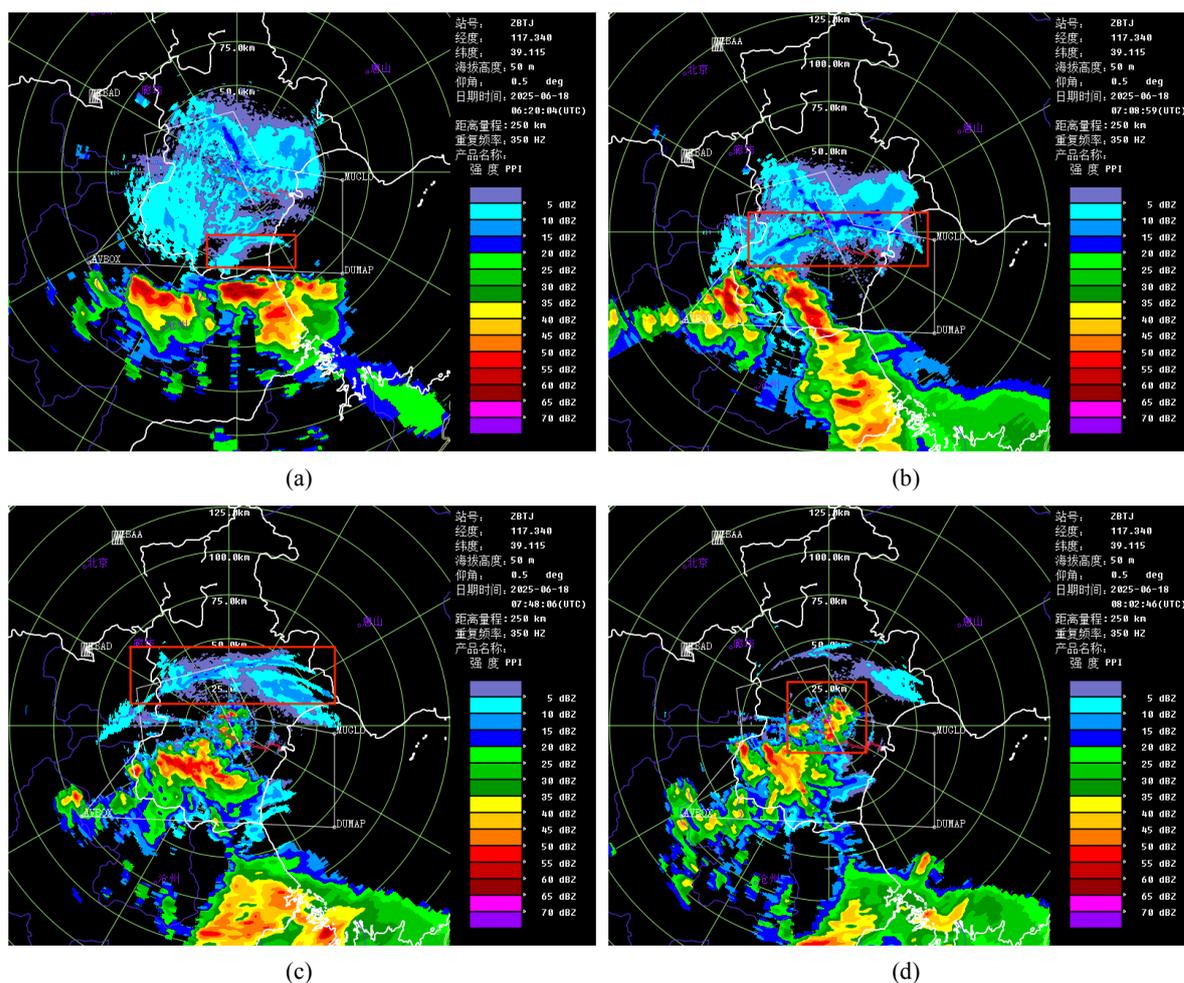
## 4.2. 水汽条件

大尺度背景下中低层均有西南暖湿气流输送,从东丽站 18 日 08 时之后的剖面图上看(图 5),20 时前中低层相对湿度看似较小,但由于相对湿度是随温度变化的,而比湿在不同温度和压力条件下可保持相对稳定、不随温度变化,14 时 850 hPa 比湿达 10~13 g/kg,整层可降水量达 40~46 g/m<sup>2</sup>(图略)。

## 5. 雷达回波特征

### 5.1. 本场多普勒天气雷达

18 日午后,河北沧州北部和东部、山东滨州一带的对流发展增强,并且呈现北上趋势,14:00 后逐渐移近天津南部,尚未进入机场终端区,因此原本预计影响本场时间在 16:00 之后。



**Figure 6.** 0.5 degree elevation reflectivity factor graph of Doppler weather radar at Tianjin Airport on June 18: (a) 14:20, (b) 15:08, (c) 15:48, (d) 16:02

**图 6.** 6 月 18 日天津机场多普勒天气雷达 0.5 度仰角反射率因子图: (a) 14:20、(b) 15:08、(c) 15:48、(d) 16:02

受南部雷暴云中强烈辐散下沉大风的影响,14:20 开始在本场多普勒天气雷达低仰角东南方向 50 km 附近出现较为清晰的阵风锋(图 6(a))。随着阵风锋扩大并向北推进,天津南部不断有新的对流单体被激发,强度较强并维持;15:08 阵风锋已接近本场(图 6(b)),随后本场附近开始触发对流并快速发展(图 6(c)),15:30 实况 METAR 报文显示本场已经出现平均风速 14 m/s、阵风风速 20 m/s 的偏南大风,15:47 观测到

小阵雨、15:57 闻雷，16:02 强回波已覆盖本场大部(图 6(d))，16:04 观测发布关于 TSRA (雷暴伴中阵雨) 的 SPECI 报文；随后，当阵风锋与其触发的对流系统逐渐远离时，暖湿空气被扩展的冷池切断，对流逐渐减弱，16:30 本场天气减弱至-TSRA (雷暴伴小阵雨)，17:00 整个过程结束。

从 15:53 的雷达导出产品来看，回波顶高(图 7(a))已发展超过 10 KM，尤其在西南方向的回波高度较高；与之对应的垂直液态水含量(图 7(b))也非常高(超过  $70 \text{ kg/m}^2$ )，尤其在静海区出现 VIL “空洞”(在最高阈值颜色之上的黑色区域)，表示此地较大概率有冰雹出现。

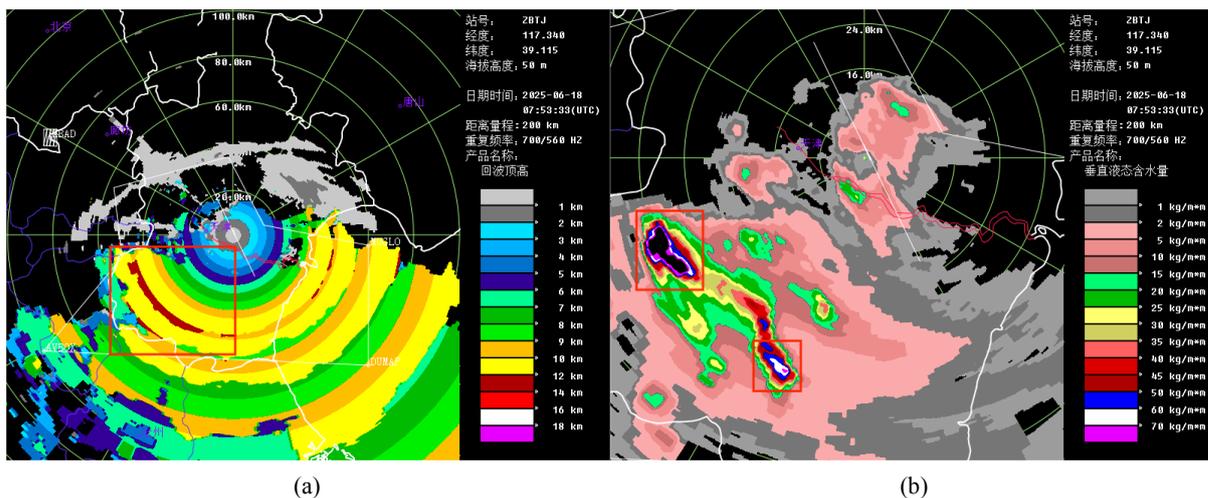


Figure 7. 15:53 on June 18: (a) Echo Top (ET), (b) Vertical Integrated Liquid (VIL)

图 7. 6 月 18 日 15:53: (a) 回波顶高 ET、(b) 垂直液态水含量 VIL

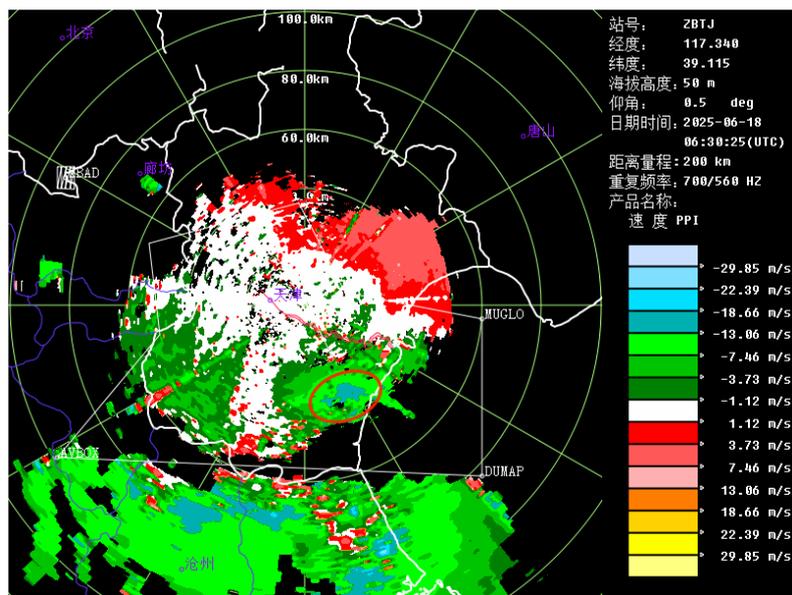


Figure 8. 0.5 degree radial velocity at 14:30 on June 18

图 8. 6 月 18 日 14:30 0.5 度仰角径向速度图

0.5°仰角径向速度图上的径向速度负值区面积明显多于正值区(图 8)，且两者数值相差较大，说明本场南部及周边地区存在明显的辐合上升运动，同时可以看到有大风速核存在，负速度指向雷达，风速已超过  $18.66 \text{ m/s}$ ，在风暴中下沉气流的作用下使得高空动量下传。15 时的地面散度场(图 9)上红色区域即

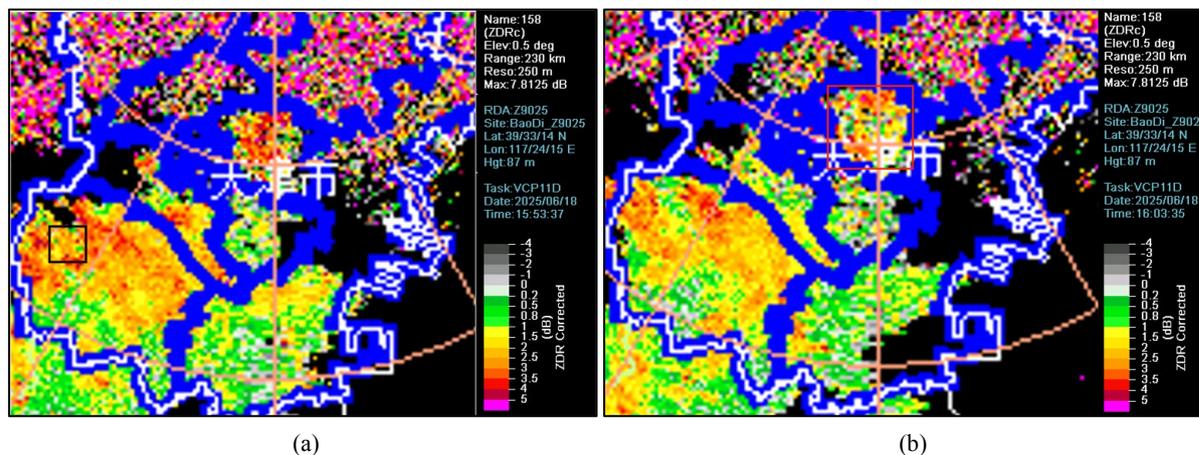
为已达到地面辐合阈值(经验值 $-3 \times 10^{-3}$ )的位置。由于环境场具备显著的不稳定层结,同时低层水汽条件较好,所以只要有一定扰动就可以成云致雨,本次暖区对流的触发机制即为南部强雷暴云底辐散下沉导致的阵风锋,当其移入有利区域时(地面辐合区和地面露点较大区),带来的强辐合有利于锋前暖湿气流抬升形成新单体,引导对流迅速传播,进而导致了本场雷暴大风和短时强降水天气过程的发生。



Figure 9. Surface divergence field at 15:00 on June 18 (★ for the airport location)  
图 9. 6月18日15:00地面散度场(★为机场位置)

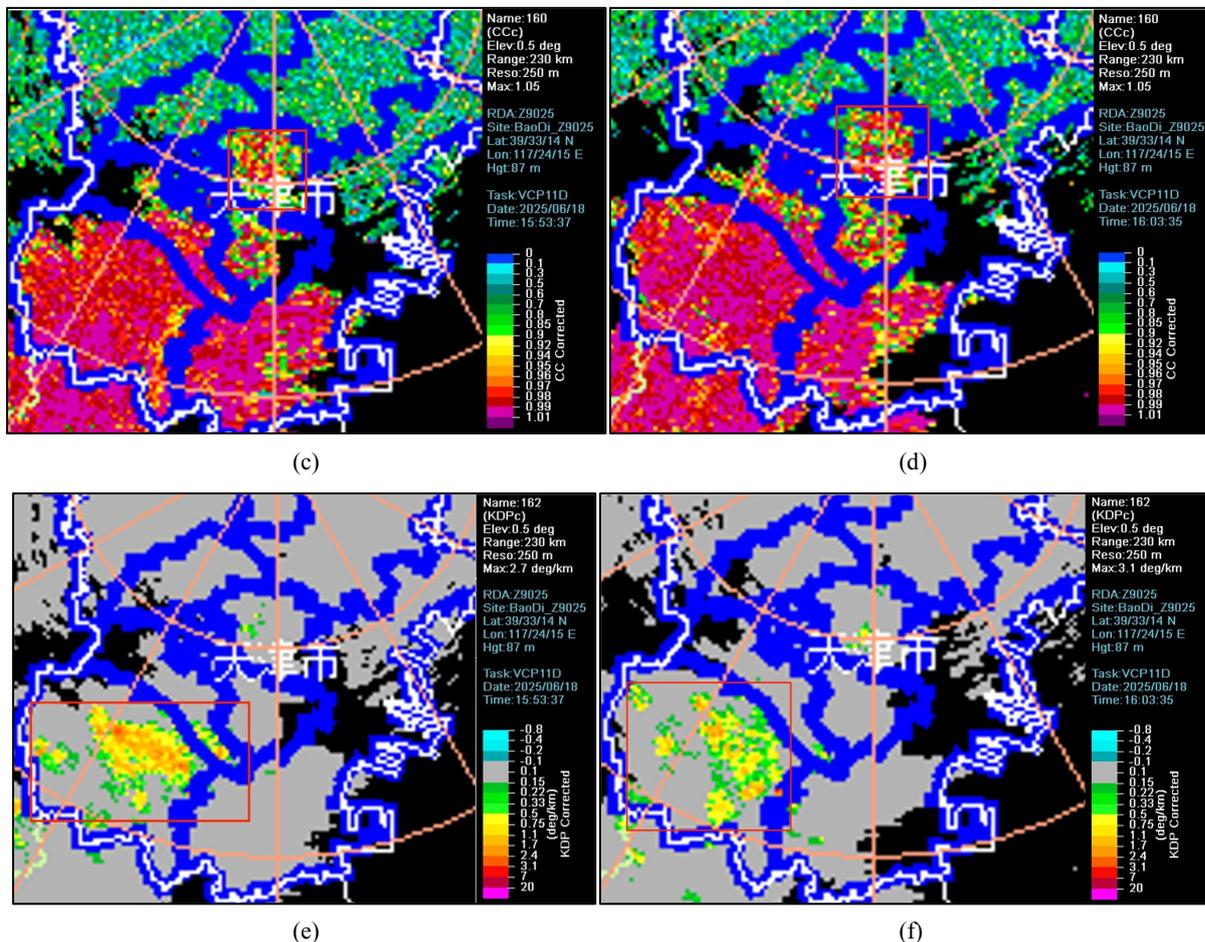
## 5.2. 双偏振雷达

与反射率因子大值区对应的差分反射率因子(Differential Reflectivity,以下简称 $Z_{DR}$ )也较大(图 10(a),图 10(b)),最大超过 4.0 dB,说明强回波区域内存在扁平状的较大雨滴,15:53 在本场西南方向存在与反射率因子数值相反的 $Z_{DR}$ 相对偏小的区域,说明此处较大概率有冰雹粒子出现;终端区的相关系数(Correlation Coefficient,以下简称 CC)(图 10(c),图 10(d))基本均在 0.9 以上(黄色至红色色标),说明粒子的形状、相态均一性较高;差分相移率(Specific Differential Phase,以下简称 $K_{DP}$ )(图 10(e),图 10(f))在静海和本场附近均有接近 1 的区域,表示区域内雨滴数密度较大。在雨雹混合降水中,由于冰雹在下落过程中的随机翻滚,统计意义上冰雹不会对 $K_{DP}$ 的取值有影响, $K_{DP}$ 的大小仅由液态雨贡献,因此可以判断地面雨强较大。



(a)

(b)



**Figure 10.** 0.5° degree dual polarization radar on June 18: Differential Reflectivity ( $Z_{DR}$ ) at (a) 15:53, (b) 16:03; Correlation Coefficient (CC) at (c) 15:53, (d) 16:03; Specific Differential Phase ( $K_{DP}$ ) at (e) 15:53, (f) 16:03

**图 10.** 6 月 18 日双偏振雷达 0.5 度仰角: 差分反射率  $Z_{DR}$  (a) 15:53、(b) 16:03; 相关系数 CC (c) 15:53、(d) 16:03; 差分相位移  $K_{DP}$  (e) 15:53、(f) 16:03

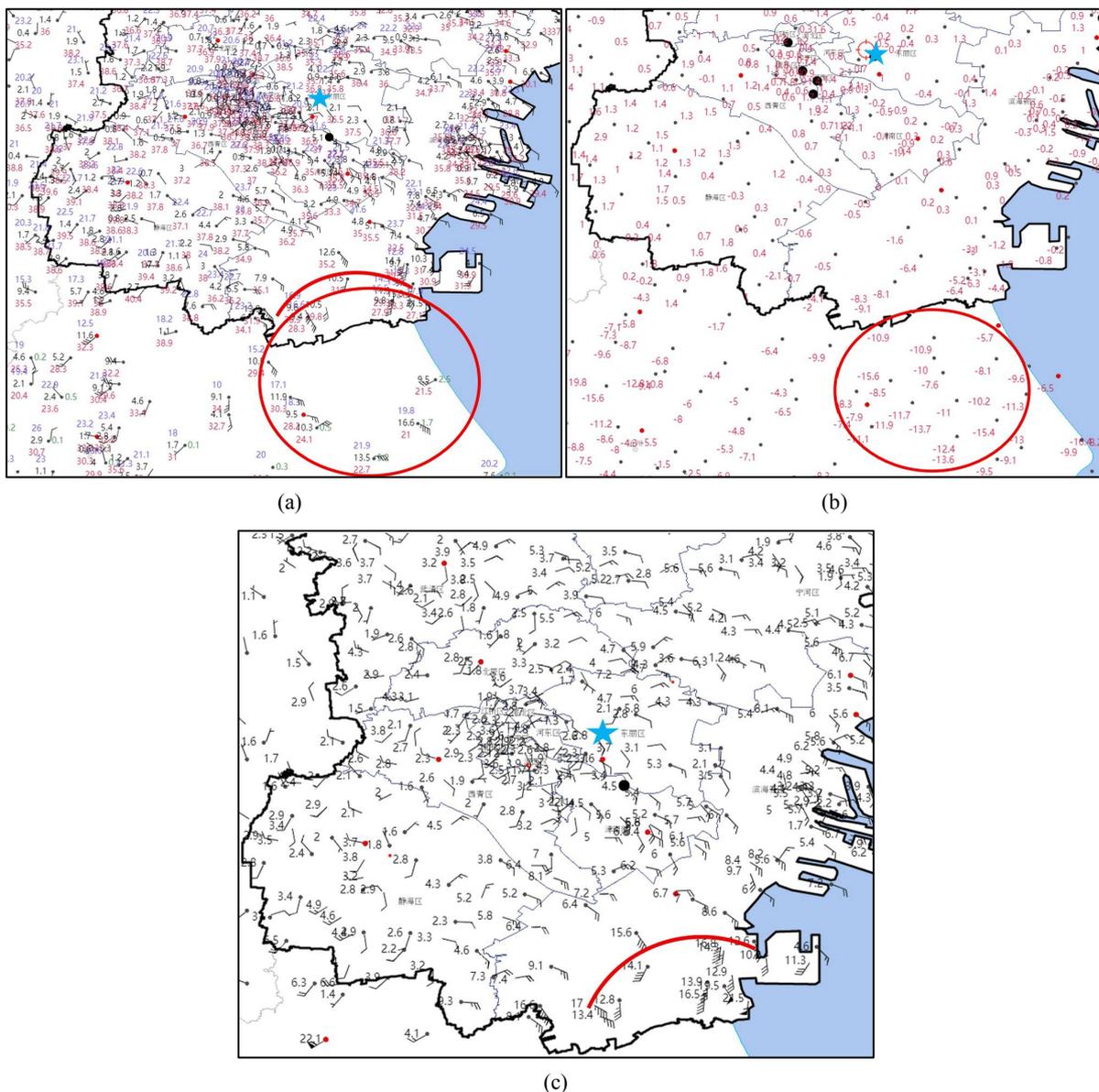
## 6. 自动站资料分析

### 6.1. 自动站要素分布

在对流单体的成熟阶段, 冷性下沉气流作为一股冷空气, 冷池前沿与阵风锋基本一致, 伴随有很强的温度梯度(两侧温差较大)和水平风切变, 在近地面的底层向外扩展, 与单体运动前方的暖湿气流交汇而形成阵风锋(即出流边界)。从 14:20 地面自动站的各要素来看(图 11(a)), 与强回波相对应的位置存在明显的冷池出流, 中心 1 小时变温最高达  $-14^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ (图 11(b)), 同时四周伴随辐散大风, 其前沿与低仰角反射率因子图上阵风锋位置基本一致, 锋后气压、气温发生显著变化, 雷暴高压后与锋前为低压区, 因此在阵风锋过境本场前, 本场气压从 1002 hPa 下降至 1000 hPa, 过境时气压快速上升, 过境后再次下降。对比反射率因子可发现, 雷暴高压(即冷池)的形状与产生阵风锋的强回波形状相似, 张涛等[3]对地面要素场分析后发现雷暴高压以及后部低压均处于低温、低比湿区, 锋后等温、压、相对湿度线密集, 且高压前部等值线比高压后部等值线更密集, 锋后等相对湿度线和等温线近似平行, 到达地面的空气越冷, 湿度越大, 当气压梯度与温度梯度越大, 出流强度就越大, 产生的瞬时大风就越强, 阵风锋越强。随着阵风锋向前传播, 冷池逐渐向外扩展, 所经过的地方温度露点均明显下降, 且伴随着风向风速的快速改

变；过境本场时，1小时变温最高达 $-10^{\circ}\text{C}$ 以上(图略)。

从地面极大风速场的分布可以看出(图 11(c))，阵风锋前后风场有明显的辐合，锋后出流性大风风向近似垂直于锋线，瞬时风速最高可达  $20\text{ m/s}$ ，且迅速向前传播，从 14:20 在雷达图上开始识别到阵风锋，仅过 30 min 就移动至机场终端区外围，对流传播迅速(移速大约  $30\text{ km/h}$ )，预报员 14:47 发布大风及风切变警报、15:04 发布雷雨警报。



**Figure 11.** 14:20 on 18 June: (a) surface temperature, dew point, and 2-minute mean wind direction and speed, (b) 1-hour surface temperature change, (c) 10-minute maximum surface wind direction and speed (★ for the airport location)

**图 11.** 6月18日14:20: (a) 地面温度、露点以及2分钟平均风向风速、(b) 地面1小时变温、(c) 地面10分钟极大风向风(★为机场位置)

## 6.2. 单站要素变化趋势

分析滨海空港物流区自动站的气温、降水量、风向风速、相对湿度变化后发现(图 12)，阵风锋过境

前地面风速较弱( $\leq 3$  m/s), 相对湿度在 40%以下, 温度超过 35 $^{\circ}$ C; 阵风锋过境时, 地面风速明显增加至 10 m/s, 相对湿度最低时位于阵风锋刚过境时, 随后由于锋后大幅降温, 使得空气更接近饱和、相对湿度明显上升, 气压由 1000 hPa 增加至 1002 hPa; 阵风锋过境后地面开始出现降水。

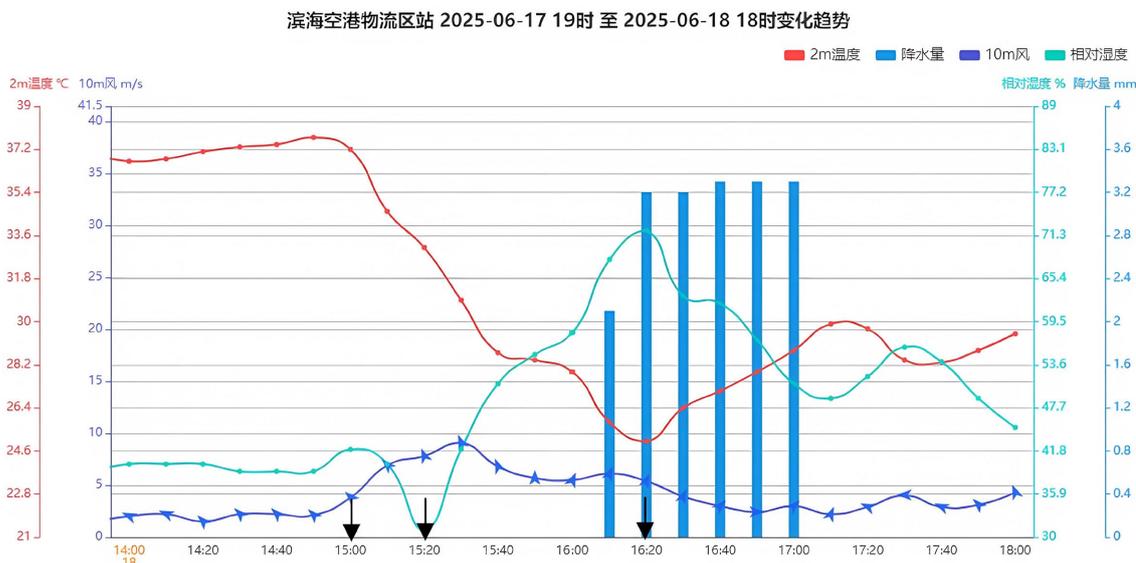


Figure 12. Evolution of meteorological elements at the automatic station of Binhai Airport Logistics Zone during Gust Front Passage on June 18

图 12. 6 月 18 日阵风锋过境时滨海空港物流区站自动站气象要素演变

综上, 阵风锋过境时可以引起风速增大、气温骤降、气压涌升、相对湿度增大现象。

### 7. 历史过程对比

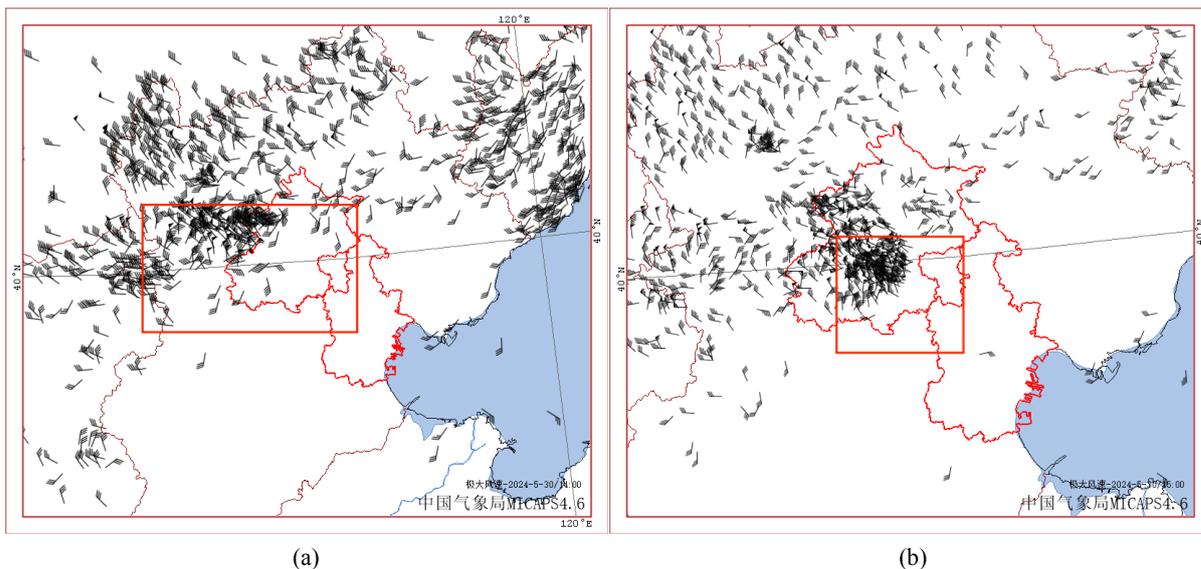


Figure 13. 1-hour extreme wind direction and speed at surface on May 30, 2024: (a) 14:00, (b) 15:00

图 13. 2024 年 5 月 30 日地面 1 小时极大风向风速: (a) 14:00、(b) 15:00

与 2024 年 5 月 30 日阵风锋过程对比, 14:00 地面自动站极大风(图 13)已经可以看出上游山区风速较

大，且与南部偏南风形成地面辐合线，至 15:00 带状对流已下山，回波强度有所减弱，但地面风速仍较大；15:46 雷达图上(图 14，实况无雷暴、仅有积雨云形成)在弓形回波前沿开始有阵风锋形成，16:26 前后阵风锋过境本场后开始触发对流单体，由于当日大气较为干燥、露点较低(11℃~12℃)，而在雷暴出流影响下地面进一步降温降湿，低空变得更为干冷，地面露点最低下降至 9℃，对流还未来得及继续发展就逐渐减弱消失，此外受大风影响还短时出现了高吹尘天气。

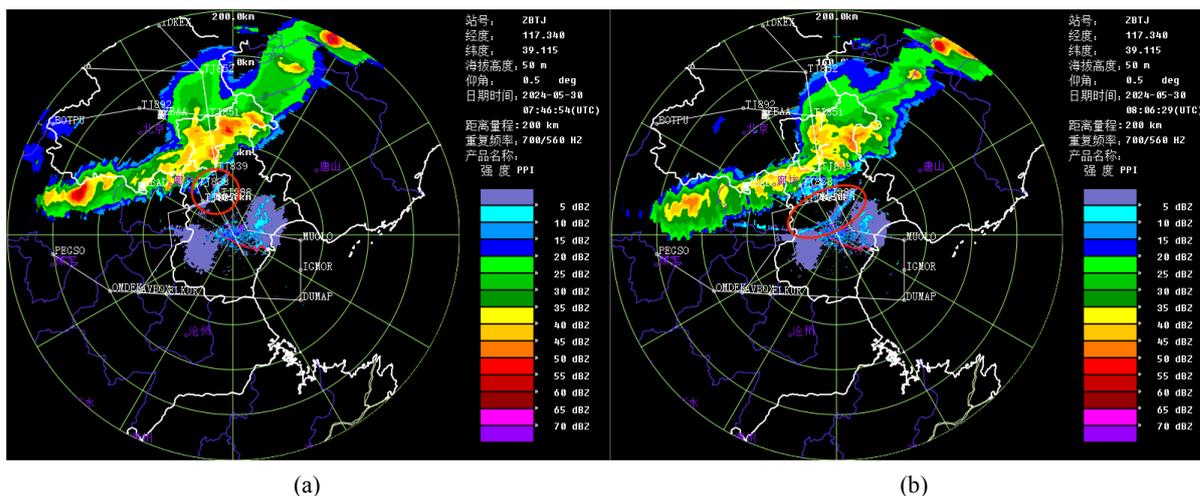


Figure 14. 0.5 degree elevation reflectivity factor graph on May 30, 2024: (a) 15:46, (b) 16:06

图 14. 2024 年 5 月 30 日 0.5 度仰角反射率因子图: (a) 15:46、(b) 16:06

## 8. 总结和讨论

2025 年 6 月 18 日午后天津机场发生了一次强对流天气过程，其典型特征是强降水回波前沿形成阵风锋，给所经之地带来了雷暴大风、短时强降水及冰雹等天气。通过分析得出如下结论：

(1) 此次阵风锋发生的大尺度环流背景为高空冷涡底部偏西气流，叠加中低层西南暖湿气流，形成上干冷下暖湿的不稳定层结，高空槽整体呈前倾结构，有强对流基础背景条件。地面的中尺度高压外流冷空气与环境风场之间形成的中尺度辐合线，对新的雷暴生成起到了有利作用。

(2) 在暖区的高能高湿背景下，只要有一定的扰动，就有可能触发对流天气，因此雷雨季节需要对 08 时实况探空进行订正后再分析。随着地面温度和露点的升高，CAPE 可能大幅增加；在水汽条件分析上，相对湿度不一定反应真实的大气水汽含量，应关注比湿等不随温度变化的水汽参数，此外在暴雨复盘中还分析水汽通量散度来判断水汽辐合辐散。

(3) 雷暴云下冷池出流与暖湿的环境大气之间形成中尺度边界，即阵风锋。阵风锋传播过程中容易在地面辐合区和较好露点条件的有利位置触发对流；在对流触发后，关注回波顶高、垂直液态水含量、差分反射率、差分相移率等产品，分析是否有冰雹、短时强降水等极端天气出现；冷池出流前沿与低仰角反射率因子图上阵风锋位置基本一致，阵风锋前后风场有明显的辐合，锋后出流性大风风向近似垂直于锋线，当气压梯度、温度和露点梯度越大，出流强度就越大，产生的瞬时大风越强，阵风锋就越强；阵风锋过境时可以导致风速增大、气温骤降、气压涌升、相对湿度增大；而当扩展的冷池将暖湿空气切断，对流就很难触发或逐渐减弱消失。

(4) 在临近预报中应加密观测雷达资料，在观测到本场附近有较强雷暴云团时，关注径向速度图上是是否有大风速核出现、低仰角雷达图上是否观测到阵风锋，当阵风锋朝向本场移动时，极大概率会给机场带来大风天气，应果断发布大风及风切变警报做出预警提示并对管制部门做好风向风速的服务；加密监

测自动站风场和温度露点场，尽可能提前发现触发新生对流的征兆。因此在阵风锋出现时，既要监测阵风锋带来的极端大风，又要关注阵风锋所触发的强对流天气给机场带来的影响。

(5) 有研究表明中层径向辐合对阵风锋产生有提前预示作用，提前量为半小时左右，辐合持续时间越长、阵风锋生命史越长[3]，风廓线雷达产品可以反映阵风锋过境期间的水平风场变化特征和垂直气流变化特征[8]。但实际工作中识别中层径向辐合的难度较高，通常只作为复盘分析的事后关注点，在后续统计分析时，可进一步研究径向速度图及其剖面特征，利用本场风廓线雷达并与气象局风廓线产品进行对比后来反演垂直方向大气运动情况，积累更多的个例样本深入分析其触发机制，加强线性外推估计的准确性，为预警强天气提供宝贵的时间提前量。

## 注 释

本文图片由 MICAPS、PUP、天津市一体化平台制图。

## 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] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 305-348.
- [3] 张涛, 李柏, 杨洪平, 等. 三次雷暴导致的阵风锋过程分析[J]. 气象, 2013, 39(10): 1275-1283.
- [4] 郑丽娜, 刁秀广. 一次华北飚线的阵风锋天气过程分析[J]. 气象, 2016, 42(2): 174-182.
- [5] 何娜, 俞小鼎, 丁青兰, 肖现, 邢楠, 柳克. 北京地区雷暴阵风锋触发对流新生的环境场特征分析[J]. 高原气象, 2023, 42(5): 1285-1297.
- [6] 席宝珠, 俞小鼎, 孙力, 等. 我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法[J]. 气象, 2015, 41(2): 133-142.
- [7] 胡文东, 杨侃, 黄小玉, 纪晓玲, 穆建华, 王敏, 杨建玲, 郑晓辉. 一次阵风锋触发强对流过程雷达资料特征分析[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1452-1464.
- [8] 苏继锋, 王海龙, 刘勇, 李帅, 康汉青. 一次阵风锋触发的强对流天气过程分析[J]. 大气与环境光学学报, 2025, 20(1): 34-46.