

乌鲁木齐机场一次雷暴外流引发风切变的成因分析

王楠, 胡建军

民航新疆空中交通管理局, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月14日; 发布日期: 2025年11月21日

摘要

为提高对雷暴外流引发风切变的认知并提升机场预警预报能力, 本文利用FNL $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 再分析资料、机场自动观测资料、多普勒雷达资料及激光测风雷达资料, 对2023年6月21日夜间乌鲁木齐国际机场发生的雷暴外流风切变过程展开系统分析。结果表明: (1) 此次过程受巴湖暖脊脊前西北气流输送冷空气、地面切变线辐合共同驱动, “下层暖湿、上层干冷”的垂直温湿廓线与低空辐合-高空辐散配置提供了有利对流环境; (2) 多普勒雷达监测到多单体风暴相互作用激发大风东移, 激光测风雷达捕捉到200~500米高度20 m/s大风核及低空急流下压过程, 下滑道风场风向快速转换(偏北-西北-西南)与0.14/s侧风切变指数是航空器中止进近、复飞的直接原因。

关键词

激光测风雷达, 低空风切变, 飞行安全, 风场结构特点

Analysis of the Causes of Wind Shear Induced by Thunderstorm Outflow at Ürümqi Airport

Nan Wang, Jianjun Hu

Xinjiang Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Urumqi Xinjiang

Received: October 13, 2025; accepted: November 14, 2025; published: November 21, 2025

Abstract

To enhance the understanding of wind shear induced by thunderstorm outflows and improve the airport's early warning and forecasting capabilities, this study conducts a systematic analysis of the thunderstorm outflow-induced wind shear event that occurred at Urumqi International Airport on

文章引用: 王楠, 胡建军. 乌鲁木齐机场一次雷暴外流引发风切变的成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1362-1371. DOI: 10.12677/ccrl.2025.146136

the night of June 21, 2023. The analysis utilizes FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ reanalysis data, airport automatic observation data, Doppler radar data, and lidar wind profiler data. The results show that: (1) This event was jointly driven by the cold air transport from the northwest airflow ahead of the Balkhash Lake warm ridge and the convergence of the surface shear line. The vertical temperature and humidity profile characterized by “warm and moist air in the lower layer and dry and cold air in the upper layer”, combined with the configuration of low-level convergence and upper-level divergence, provided a favorable convective environment. (2) Doppler radar detected that the interaction of multi-cell storms triggered the eastward movement of strong winds. The lidar wind profiler captured a strong wind core with a speed of 20 m/s at an altitude of 200~500 meters and the downward propagation process of the low-level jet. The rapid wind direction change (from northerly to northwesterly to southwesterly) in the glide path wind field and the crosswind shear index of 0.14/s were the direct causes for aircraft to abort approach and go around.

Keywords

Lidar Wind Profiler, Low-Level Wind Shear, Flight Safety, Wind Field Structure Characteristics

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

低空风切变(LLWS)是指在地面以上约 500 米(1600 英尺)高度或以下发生的风速和/或风向的突然变化[1], 风切变会显著改变飞机的气动条件, 影响空速、升力和机动性这种现象对航空安全构成严重威胁, 尤其是在飞机起降阶段[2]。

产生风切变的原因有很多种, 其中雷暴大风产生的风切变最为常见。在雷暴的演变过程中, 通常分为发展、成熟和消散三个阶段[3]。在成熟阶段, 强烈的上升气流将暖湿空气抬升, 形成水凝物, 随后这些水凝物在重力作用下下落, 形成降水。伴随降水, 冷空气也随之下沉, 当冷下沉气流到达地面时, 会向四周爆发性地辐散, 形成阵风锋(gust front) [4]。雷暴外流引发的风切变: 这是由雷暴下沉气流到达地面后向外扩散所形成的[5]。雷暴下击暴流的风速垂直廓线与传统边界层风速廓线显著不同。在传统边界层中, 风速通常随高度增加, 但在下击暴流中, 最大风速可能出现在 100 米至 300 米的高度[6]。

激光测风雷达在风切变研究中优势显著, 时空分辨率高, 能秒级、米级捕捉风切变突发特征; 可三维立体观测, 完整解析风切变垂直与水平结构; 数据精度高, 为风切变定量诊断提供支撑, 弥补传统设备不足, 助力研究与预警, 在大风和风切变研究中得到了较好的应用和验证[7]-[10]。2023 年 6 月 21 日乌鲁木齐国际机场发生了一次雷暴外流引发的风切变, 文章将利用 FNL $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料、机场自动观测资料、多普勒雷达资料及激光测风雷达资料, 通过对环流背景、不稳定条件、水汽条件、抬升触发机制等进行成因诊断分析对雷暴大风及风切变发生时的风场结构进行分析, 加深对雷暴风切变得认知, 提高预警预报能力。

2. 天气过程概述及对机场运行的影响

2023 年 6 月 21 日 21:21 至 22 日 02:38(北京时间, 下同), 乌鲁木齐国际机场遭遇弱雷雨天气, 伴随显著风向转换(偏西 - 西南风转为东南风), 此次天气过程对机场航班运行造成了显著的影响。本次天气过程共造成 34 架次航班延误, 其中 1 架次延误时长超 2 小时; 关键飞行事件包括: 22:57, CSN6960 航班

在建立进近阶段,距 25 号跑道入口 7.5 公里时,因接地段跑道视程(RVR)降至 400 m,且受风场突变影响,机组决定中止进近,后经重新进近于 23:19 正常落地;23:12, GCR7522 航班在 25 号跑道五边进近至距跑道入口 4 公里、高度 940 米处,因遭遇风切变触发复飞程序,重新调整后于 23:31 安全落地。

雷暴大风过境前后,机场跑道两端(07 号与 25 号跑道)风场呈现剧烈变化(图 1(a))。过程前期,机场主导风向为偏西-西南风,平均风速 4~8 m/s;22:52 起,07 号跑道风速率先激增,2 分钟内从前期水平跃升至 16 m/s,增幅达 10 m/s,且此后数分钟内 07 号跑道风速持续高于 25 号跑道;22:56,25 号跑道风速反超 07 号跑道;22:58,25 号跑道风速进一步加大至 20 m/s,而 07 号跑道风速回落至 12 m/s,两跑道风速差值达 8 m/s。正是在这一风场快速转换时段,CSN6960 航班遭遇扬沙天气叠加低能见度,最终中止进近;23:00 后,07 号跑道风速再次反超 25 号跑道,达到 21 m/s,此后跑道两端风场逐渐趋于稳定。从天气学机制来看,该风场突变过程是雷暴强下沉气流动量下传与冷池前沿辐合共同作用的结果:雷暴云体内强下沉气流(速度可达 10~20 m/s)将高空强风动量向近地面传递,同时雷暴冷池前沿与环境暖湿气流形成强气压梯度,进一步加剧近地面风速增幅。

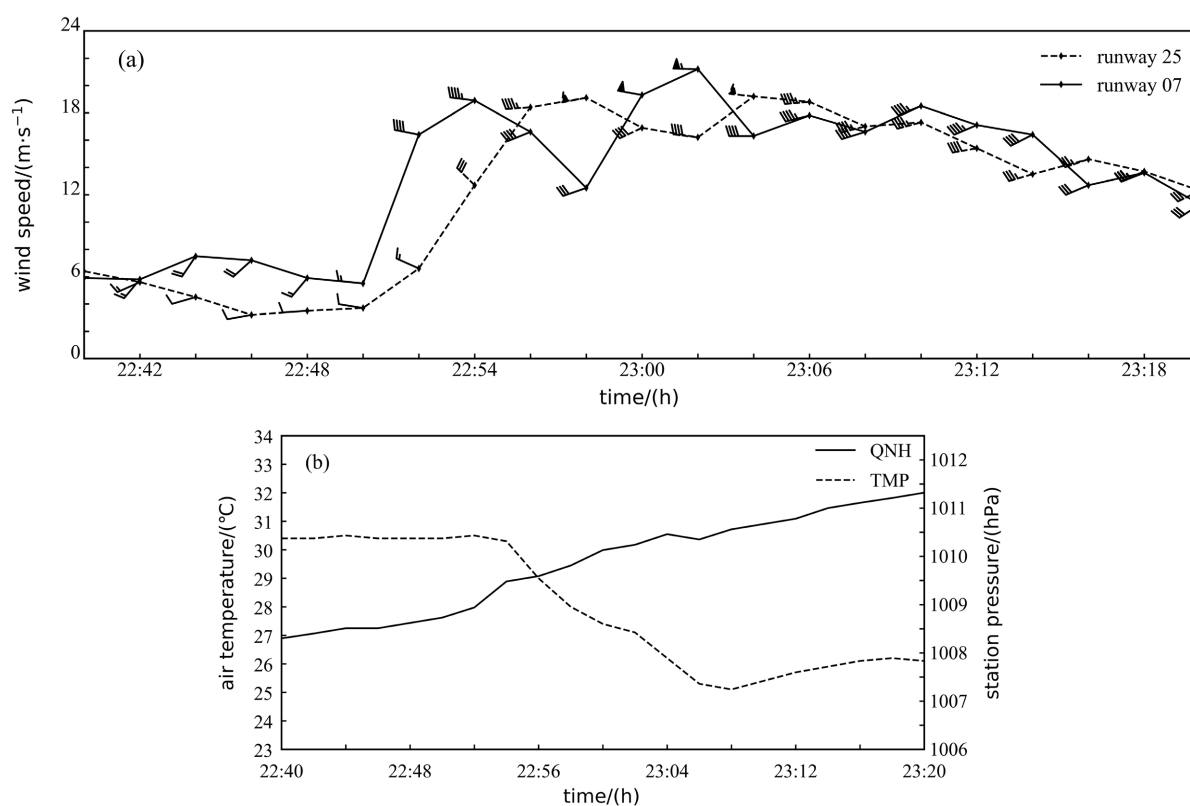


Figure 1. Distribution of AWOS meteorological elements during thunderstorm and gale periods at Urumqi Airport. (a) Time series of wind speed and direction at 2-minute intervals for Runway 25 and Runway 07; (b) Time series of temperature-pressure field for Runway 25

图 1. 乌鲁木齐机场雷暴大风时段 AWOS 气象要素分布。(a) 25 跑道、07 跑道间隔 2 min 的风速风向时序; (b) 25 跑道温压场时序图

结合机场自动观测的气压与温度数据(图 1(b))分析,22:52 起雷暴主体伴随下沉气流过境,受雷暴冷池冲击近地面与强下沉气流动量下传的双重影响,机场温压出现短时间、大幅度突变。气压方面,从 22:51 的 1008.8 hPa 快速上升,23:03 达到峰值 1010.5 hPa,12 分钟内累计升幅 1.7 hPa,其中 22:53~22:54 单分钟最大变幅达 0.3 hPa;温度方面,呈现“断崖式”下降,从 22:51~22:52 的 30.5°C 快速回落,23:05 降至

最低 25.7℃, 14 分钟内累计降温 4.8℃, 22:55~22:56 单分钟最大降温 0.8℃, 这一温压突变特征是雷暴“冷池”效应的直接气象表现, 也是雷暴外流影响机场的重要信号。

2. 环流背景及雷达回波特征分析

2.1. 天气形势分析

2023 年 6 月 21 日夜間, 新疆伊犁河谷至北疆沿天山一线出现大范围雷雨阵风天气, 乌鲁木齐国际机场处于该天气系统影响范围内。从 21 日 20 时 500 hPa 形势场(图 2(a))可见, 巴尔喀什湖暖脊呈向北拓展态势, 其脊前西北气流不仅是冷空气输送的主要通道, 还伴随风速辐合现象与冷空气堆积过程。值得注意的是, 暖脊区域径向度显著减弱, 对于乌鲁木齐机场所在区域而言, 这一形势变化标志着冷空气在区域内的持续堆积与缓慢渗透, 为后续强对流天气发生储备了冷平流条件。与此同时, 地面天气图(图 2(b))显示, 从北疆盆地延伸至沿天山一带存在一条呈南北走向的地面切变线, 乌鲁木齐机场恰好位于该切变线南端——切变线附近风向与风速的辐合效应十分突出, 为对流运动的触发提供了有利的低层动力条件。

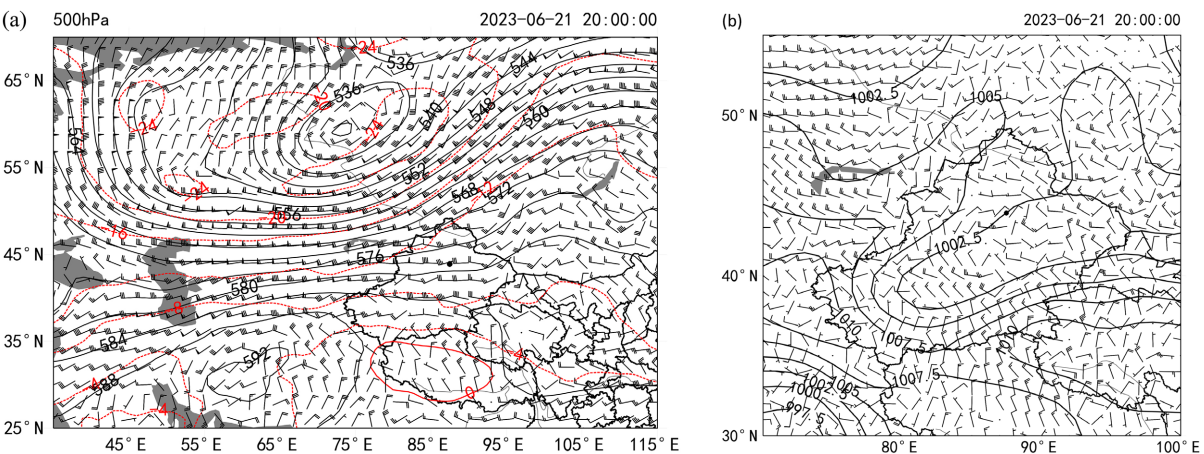


Figure 2. Circulation pattern and meteorological element fields. (a) 500 hPa geopotential height, wind, and temperature fields at 20:00; (b) Surface pressure field at 20:00
图 2. 环流形势与气象要素场。(a) 20:00 500 hPa 高度、风和温度场; (b) 20:00 地面气压场

热力不稳定条件分析表明, 21 日 20 时北疆大部分区域已具备一定的热力不稳定, 其中较强不稳定区域主要集中在伊犁河谷与天山山区。从表征大气稳定度的 K 指数与对流有效位能(CAPE 值)分布可知, 上述强不稳定区域 K 指数(图 3(a))中心强度达 40℃, CAPE 值(图 3(b))中心强度超 700 J·kg⁻¹, 根据经验值来看 K 指数 ≥ 35℃、CAPE 值 ≥ 500 J·kg⁻¹ 即满足强对流天气发生的不稳定层结阈值, 此次过程的不稳定参数特征为雷暴天气的发生发展提供了充足的热力基础。

沿乌鲁木齐机场经纬度 87.5°E、44°N 绘制的温度、水汽通量及水汽通量散度时间垂直剖面图(图 4)进一步揭示了机场上空的垂直气象条件演变。21 日 21 时至 22 日 02 时期间, 机场中低层(850 hPa 及以下)有强烈冷空气侵入, 同时 850 hPa 及以下高度层存在明显的水汽辐合, 而 700 hPa 以上则为干区——这种“下层暖湿、上层干冷”的垂直温湿廓线结构, 是典型的强对流天气温湿配置, 会显著增强大气对流不稳定性。从垂直速度数据来看, 21 日 20 时至 22 日 02 时机场上空垂直上升速度显著增大, 中心最大强度达 14 × 10⁻² m·s⁻¹, 且垂直速度呈现从低层到高层“上升 - 下沉 - 上升”的多阶段变化特征, 整层大气的抽吸作用十分明显, 为水汽垂直输送与对流发展提供了动力支撑。

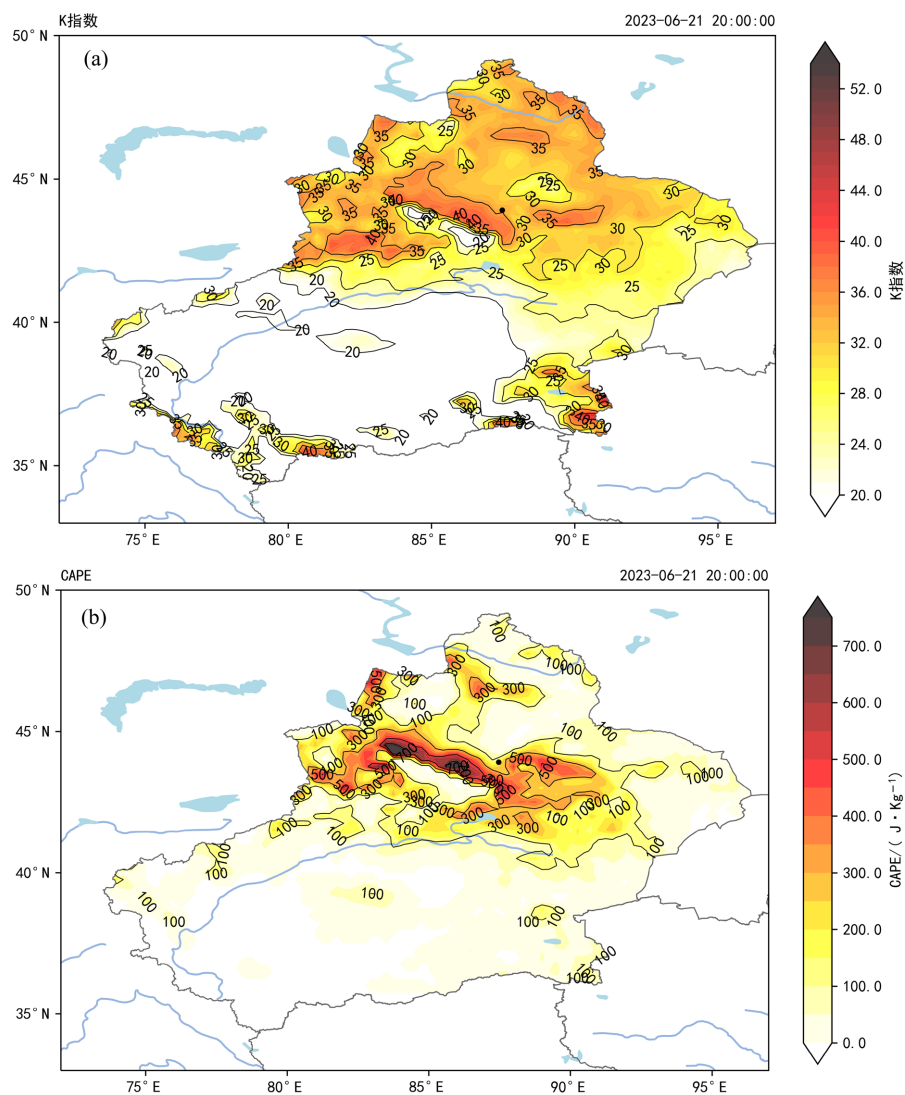
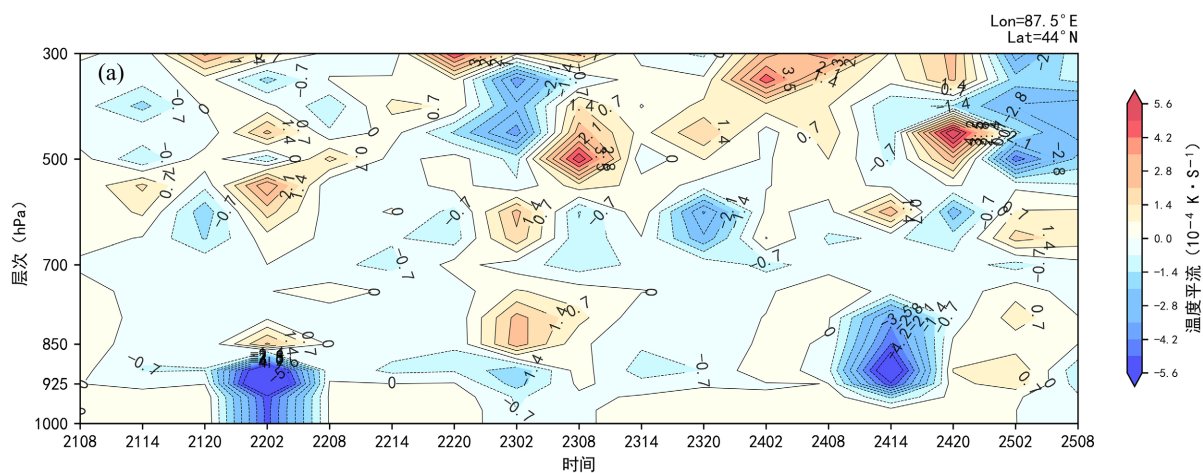


Figure 3. Distributions of K index and CAPE value. (a) Distribution of K index at 20:00; (b) Distribution of CAPE value at 20:00

图 3. K 指数与 CAPE 值分布。(a) 20:00 K 指数分布; (b) 20:00 CAPE 值分布



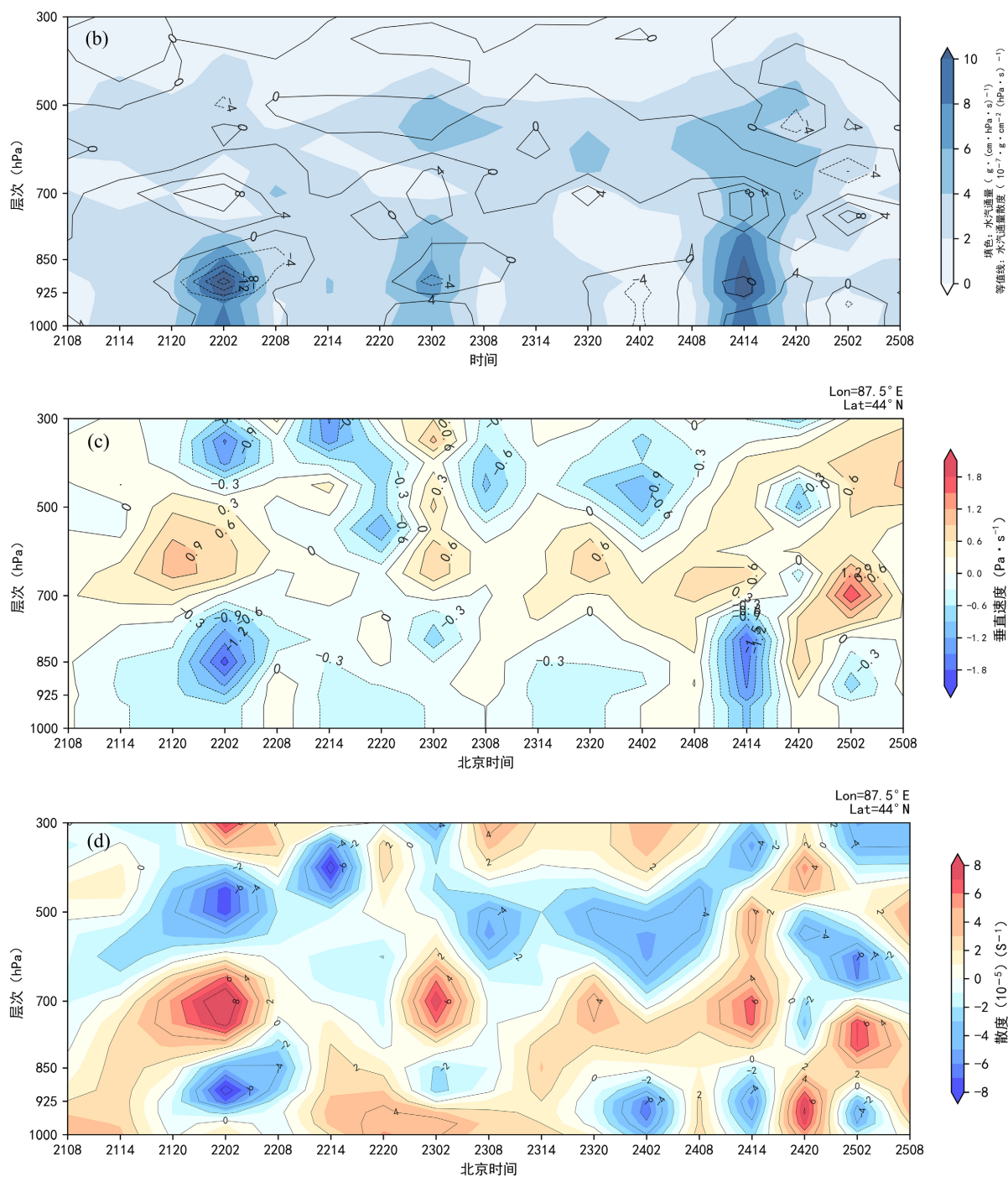


Figure 4. Height-time cross-section of meteorological elements at Urumqi Airport. (a) Temperature advection; (b) Water vapor flux/water vapor flux divergence; (c) Vertical velocity; (d) Divergence

图 4. 乌鲁木齐机场气象要素的高度-时间剖面图。(a) 温度平流; (b) 水汽通量/水汽通量散度; (c) 垂直速度; (d) 散度

高低空环流配置方面, 21 日 20 时至 22 日 02 时, 机场上空逐步形成“低层辐合、高层辐散”的经典强对流环流配置, 上升运动随之逐渐增强。20 时前后, 该配置达到最强状态: 低层 925~850 hPa 高度层出现辐合中心, 强度为 $-8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; 高层 700 hPa 附近出现辐散中心, 强度为 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ——根据大气垂直运动方程, 低层辐合引发空气抬升, 高层辐散则“抽吸”低层空气持续上升, 这种配置会显著增

强上升运动。此外, 冷空气渗透带来的冷平流、低层水汽辐合的水汽供应, 叠加天山地形对气流的强迫抬升效应, 进一步促进了上升运动的加强。垂直速度中心位于 850 hPa 高度层, 表明机场低空存在强烈上升运动, 为雷暴的触发提供了强劲的低层动力条件。同时, 低层 850 hPa 与 925 hPa 高度层上, 乌鲁木齐机场处于西北风与西南风的切变线上, 地面位于风向风速辐合区前沿, 这种“高低空切变叠加低层辐合”的配置, 有利于机场强对流天气的触发与维持, 为雷暴大风的出现提供了充沛的对流背景。

2.2. 雷达回波特征分析

多普勒天气雷达是监测预警雷暴大风等灾害性天气的核心工具, 其回波强度与径向速度数据可有效揭示风暴结构与风场演变。

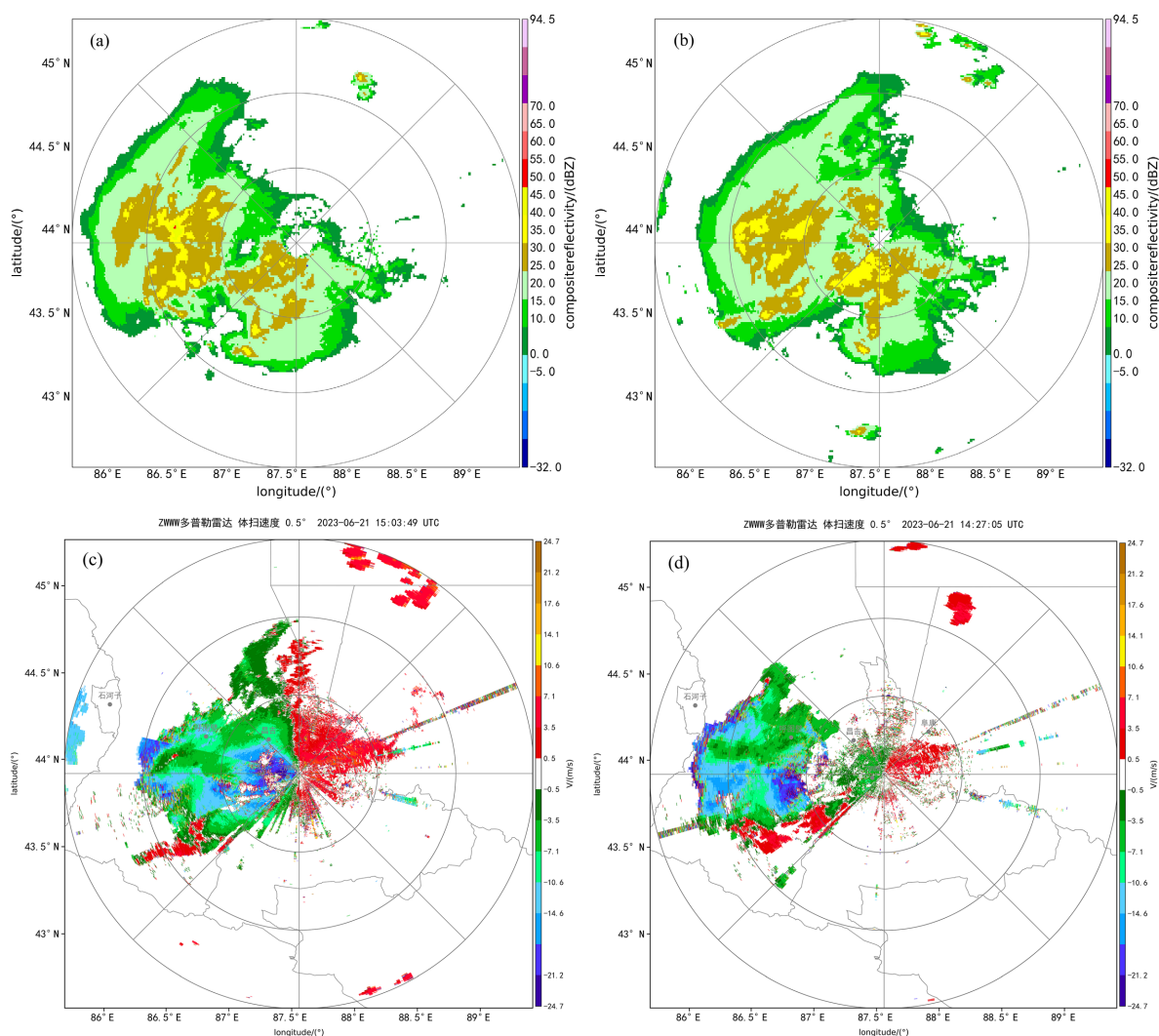


Figure 5. Radar composite reflectivity factor (Unit: dBZ) and 0.5° elevation radial velocity (Unit: m/s) during thunderstorm and gale periods ((a) 22:20, (b) 22:57, (c) 22:27, (d) 23:03)

图 5. 雷暴大风时段雷达组合反射率因子(单位: dBZ)以及 0.5°仰角径向速度(单位: m/s) ((a) 22:20, (b) 22:57, (c) 22:27, (d) 23:03)

此次过程中, 多普勒雷达观测显示, 乌鲁木齐机场西北 80 公里附近初始存在多单体风暴; 22:20 起 (图 5(a)), 机场西侧多单体雷暴进入消亡阶段, 强度减弱并缓慢东移; 与此同时, 机场西南侧的孤立单体

在向东北方向移动过程中略有加强(图 5(b)), 且与西侧减弱的单体发生相互作用——这种多单体风暴的相互作用在地表激发大风, 并以东风的风向向机场传播。值得注意的是, 多单体风暴发展期上游区域并未激发出大风, 直至 22:10 上游出现 20 m/s 的大风, 且风场强度保持稳定并持续东移; 径向速度图上出现明显的速度模糊现象(图 5(c)~(d)), 最大径向速度大于 25 m/s, 其高度约在 150 m 处——该高度与雷暴大风下沉气流的夹卷冲击高度相匹配, 印证了下沉气流动量下传的影响过程。后续随着系统持续推进, 多单体风暴减弱引发的雷暴大风持续东移, 逐步影响乌鲁木齐机场。

3. 激光测风雷达解析风场变化

激光测风雷达凭借高时空分辨率优势, 可精准捕捉机场上空风场的垂直结构与精细变化, 是分析风切变的关键设备。从激光测风雷达风廓线数据来看(图 6), 乌鲁木齐机场此次大风过程具有“起风突然”的特征, 大风脉动性强等特点。23:00 时大风核心区位于 200~500 米高度, 风速达 20 m/s; 23:50 后, 低空急流区高度逐渐降低至 500 米以下, 00:20 之前, 大风呈现明显的脉冲效应, 这与多普勒雷达回波图上多单体回波东移的影响特点一致, 反映了多单体风暴外流的间歇性特征, 00:30 进一步下压至近地面——根据风切变形成原理, 急流高度下降会导致近地面风速突变, 增加风切变风险; 此后地面风向由西南风逐渐过渡为偏南风, 这一风向转换侧面表明雷暴大风进入尾声: 此时多单体风暴已东移过机场, 机场处于单体偏西-西北侧的下沉气流影响区, 地面风向受下沉气流与环境气流共同作用转为偏南或东南风。此外, 00:00~00:30 期间, 乌鲁木齐机场 1000 米左右高度的风由西北风转为西南风, 表明低空槽过境; 后续 1000 米以上高度转为较为一致的西北气流, 进一步印证了冷空气的持续入侵。

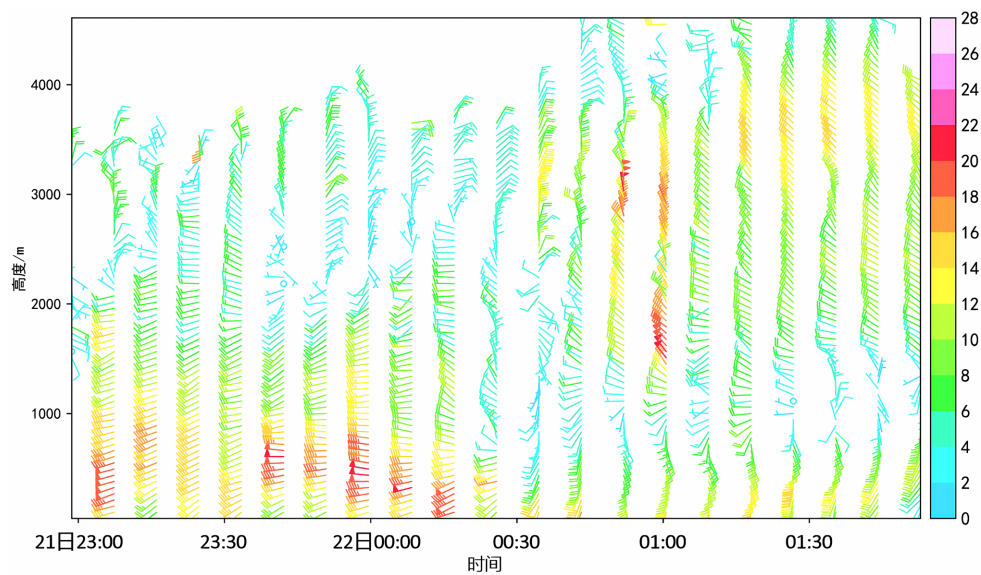


Figure 6. Time series of wind profile during the thunderstorm and gale weather process
图 6. 雷暴大风天气过程中风廓线时序图

尽管至 23:12 时, 07 号与 25 号跑道风向基本一致(均为偏南或东南风), 风速维持在 16~18 m/s, 未出现明显的跑道间风速差异, 但仍引发航空器风切变报告——其原因在于下滑道进近过程中的风场垂直与水平变化。从 23:10 的 3°俯仰角(PPI)雷达图(图 7(a))可见, 距离雷达中心 4 km (对应机场下滑道区域)的风场呈现显著的风向转换, 从偏北风转为西北风再转为西南风, 风速维持在 20~26 m/s, 且伴有严重的风切变告警(图 7(b)); 下滑道风切变告警数据(23:13)显示, 航空器右侧侧风超标, 侧风切变指数达 0.14/s——

根据民航标准, 侧风切变指数 $\geq 0.12/\text{s}$ 即达到“严重”级别, 该数值已超出安全阈值。从下滑道的距离高度显示(RHI)图 7(c)可知, 1000 米以下为偏西风, 1000 米以上逐渐转为偏东 - 东北风, 这种垂直方向的风向切变进一步加剧了低空风场的不稳定性; 4 km 距离处(对应下滑道关键阶段)的颠簸高度处风速达 18 m/s, 且伴有风切变严重告警, 最终导致航空器复飞。

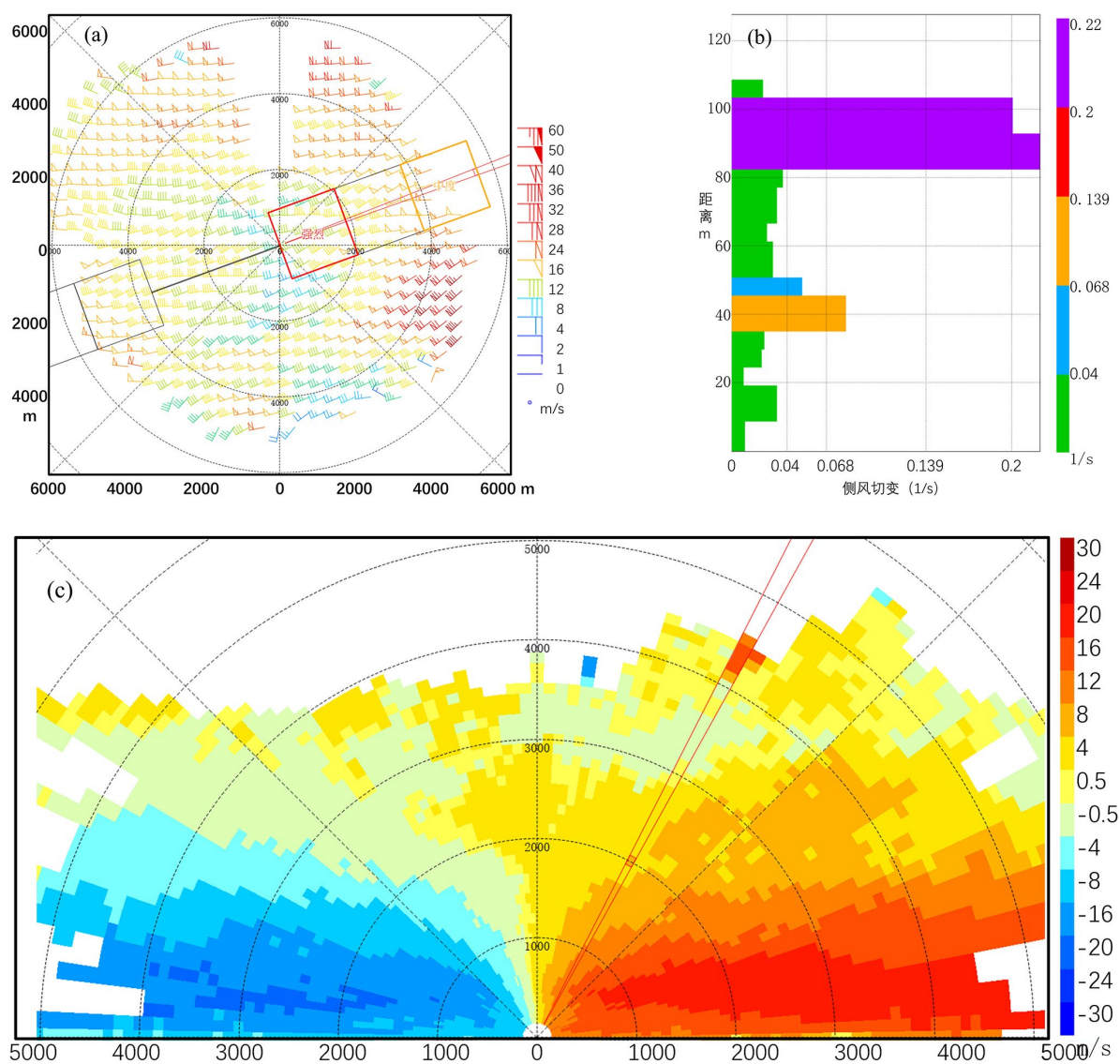


Figure 7. PPI mode radial velocity maps during wind shear process. (a) PPI wind field distribution at 23:10 (3°); (b) 25 runway glide path crosswind data at 23:13; (c) Glide path RHI radial velocity at 23:15

图 7. 风切变过程中 PPI 模式径向速度图。(a) 23:10 (3°) PPI 风场分布; (b) 23:13 25 下滑道侧风数据; (c) 23:15 下滑道 RHI 径向速度

4. 结论

1) 2023 年 6 月 21 日乌鲁木齐机场雷暴外流风切变过程, 是在“500 hPa 巴湖暖脊脊前西北气流输送冷空气 + 地面南北向切变线辐合”的环流背景下发生的; “下层暖湿(850 hPa 以下水汽辐合)、上层干冷(700 hPa 以上干区)”的垂直温湿廓线, 配合 K 指数 40°C 、CAPE 值 $700 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的热力不稳定条件, 为雷

暴发生提供了充足的能量储备;“低层辐合($925\sim 850\text{ hPa}$, $-8\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$) - 高层辐散(700 hPa , $8\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$)”的高低空配置与地形强迫抬升,共同驱动了强烈的上升运动,构成雷暴发展的动力基础。

2) 雷暴外流对机场的影响主要表现为“温压突变 + 风场剧烈变化”:气压 12 分钟内升 1.62 hPa 、温度 14 分钟内降 4.8°C ,是雷暴冷池冲击的直接体现;风场演变呈现“跑道间风速交替领先(07 号跑道先增后降、25 号跑道后发超越) - 大风核区垂直下移($200\sim 500$ 米降至近地面) - 风向逐步转换(偏西 - 西南风转东南风)”的特征,核心驱动机制是雷暴强下沉气流动量下传与冷池前沿辐合的协同作用。

多普勒雷达捕捉到多单体风暴“西侧消亡 + 西南侧加强 + 相互作用激发大风”的演变过程,径向速度模糊($>25\text{ m/s}$)与 150 米高度大风核,可作为雷暴外流的早期预警信号;激光测风雷达的高时空分辨率优势,可精准监测下滑道区域“风向快速转换(偏北 - 西北 - 西南)”与“侧风切变指数 $0.14/\text{s}$ ”的危险风场结构,为航空器进近安全提供关键数据支撑——这两类雷达的联合应用,是提升雷暴外流风切变预警精度的核心技术手段。

此次过程中,航空器中止进近与复飞的关键诱因,并非地面跑道间的显著风速差异,而是下滑道进近阶段的垂直与水平风切变——这提示机场气象预警需重点关注“下滑道关键区域(距跑道入口 $4\sim 7.5$ 公里、高度 $200\sim 600$ 米)”的风场变化,通过激光测风雷达与多普勒雷达的协同观测,建立针对进近阶段的精细化风切变预警模型,进一步提升机场应对雷暴外流天气的运行安全保障能力。

参考文献

- [1] Cho, J., Lee, Y., Baik, H. and Park, J. (2025) An Investigation of the Relationship among Weather, Low-Level Wind Shear and Aircraft Go-Around at Jeju International Airport in Korea. *Journal of Air Transport Management*, **129**, Article ID: 102860. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102860>
- [2] 梁秋枫, 苏蕾, 林航. 厦门机场一次强对流天气的气象保障分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2024, 35(4): 55-59.
- [3] 马艳, 张凯静, 郭飞燕, 等. 山东胶东半岛雷暴大风时空分布及环境参数统计分析[J/OL]. 海洋湖沼通报(中英文): 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/37.1141.p.20250924.1519.004>, 2025-09-28.
- [4] Liu, B., Wang, Y. and Liu, Y. (2015) Diagnostic Features of Thunderstorm Events Triggered by Collision between Sea Breeze Front and Gust Front over Bohai Bay. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 132-136.
- [5] 余佳. 黄花机场多次阵风锋天气过程多普勒雷达特征分析[J]. 河南科技, 2021, 40(36): 137-140.
- [6] 李桃, 郑佳锋, 白寒冰. FC-III型激光雷达对典型弱对流下低空风切变的监测研究[J/OL]. 激光技术: 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/51.1125.TN.20250508.1744.006>, 2025-09-28.
- [7] 李浩, 王媛敏. 呼和浩特白塔国际机场一次强对流天气过程分析[J]. 内蒙古气象, 2025(4): 52-56.
- [8] 谢冰洁, 王改利, 陆欣欣, 等. 基于三维测风激光雷达的风切变识别方法[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(22): 9249-9259.
- [9] 徐足音. 基于激光测风雷达的广汉机场典型超标风过程研究[D]: [硕士学位论文]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [10] 颜玉倩, 田维东, 李金海, 等. 多源数据在高原机场一次低空风切变过程分析中的综合应用[J]. 高原气象, 2020, 39(6): 1329-1338.