

## 乌鲁木齐机场一次冷锋型低空风切变过程的LiDAR分析

王楠, 尹才虎, 刘晓明, 高晋徽

### Analysis of LiDAR in a cold front low-level wind shear in Urumqi Airport

引用本文:

王楠,尹才虎,刘晓明,高晋徽. 乌鲁木齐机场一次冷锋型低空风切变过程的LiDAR分析[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 565–571.

WANG Nan, YIN Caihu, LIU Xiaoming, GAO Jinwei. Analysis of LiDAR in a cold front low-level wind shear in Urumqi Airport[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(4): 565–571.

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 基于测风激光雷达银川机场动量下传大风特征研究

引用本文: 梁希豪, 杨寅, 冯亮, 等. 基于测风激光雷达银川机场动量下传大风特征研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 432–438.

#### 2. 浅析舰船激光测风雷达技术应用及发展趋势

引用本文: 梁晓峰, 张振华. 浅析舰船激光测风雷达技术应用及发展趋势[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 768–775.

#### 3. 测风激光雷达双棱镜2维扫描系统的光学设计

引用本文: 蒋佳佳, 沈法华, 周慧, 等. 测风激光雷达双棱镜2维扫描系统的光学设计[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 425–431.

#### 4. 脉冲激光诱导石墨等离子体羽辉特性研究

引用本文: 周素素, 王新兵, 尹培琪, 等. 脉冲激光诱导石墨等离子体羽辉特性研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 796–800.

#### 5. 星载激光雷达高灵敏信号探测的关键技术研究

引用本文: 武学英, 崔健永, 郑伟, 等. 星载激光雷达高灵敏信号探测的关键技术研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 881–885.

文章编号: 1001-3806(2023)04-0565-07

## 乌鲁木齐机场一次冷锋型低空风切变过程的 LiDAR 分析

王楠<sup>1</sup>, 尹才虎<sup>1</sup>, 刘晓明<sup>1</sup>, 高晋徽<sup>2\*</sup>

(1. 中国民用航空局新疆空管局气象中心, 乌鲁木齐 830016; 2. 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225)

**摘要:** 为了研究低空风切变风场结构, 针对乌鲁木齐机场 2021-11-26 发生的风切变不安全事件, 采用 FC-III 型激光测风雷达产品数据, 配合美国国家环境预报中心再分析资料和常规气象观测资料进行分析和验证, 取得了风切变演变过程的数据。结果表明, 该次风切变过程发生在特定的地形风作用下, 冷锋前小尺度冷空气造成显著的风向风速变化, 东南风急流底部与西北风风带形成倾斜向上的垂直切变区, 并引发冷锋型低空风切变; 风切变发生前 1 h, 乌鲁木齐机场周边出现了风场转换; 平面位置显示模式比航空器报告提前 10 min 监测到风切变, 为东南大风风速骤减区, 且风切变区随冷空气渗透西移; 冷空气渗透过程东南大风层变薄西撤; 07<sup>#</sup>跑道附近, 正侧风迅速减小且进近过程中伴有风向的大角度转变; 冷空气由 25<sup>#</sup>跑道向 07<sup>#</sup>跑道楔形渗透, 渗透过程发生在 08:30~10:25 期间; 激光雷达捕捉到该次低空小尺度冷空气活动, 分析出冷空气由东北侧进入呈后倾状态的演变过程和结构, 并触发了中度风切变预警。这一结果对提高气象服务保障能力是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 测风激光雷达; 低空风切变; 飞行安全; 风场结构特点

**中图分类号:** TN958.98; P412.25 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.04.019

## Analysis of LiDAR in a cold front low-level wind shear in Urumqi Airport

WANG Nan<sup>1</sup>, YIN Caihu<sup>1</sup>, LIU Xiaoming<sup>1</sup>, GAO Jinwei<sup>2</sup>

(1. Meteorological Center, Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Urumqi 830016, China; 2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of the structure of wind shear, the low-level wind shear at Urumqi Airport on 2021-11-26 was analyzed by using the FC-III wind light detection and ranging (LiDAR) data, the reanalysis data of National Centers for Environmental Prediction, and conventional meteorological observation data. The evolution of wind shear was calculated. The results show that, the wind shear process occurred under the condition of a specific terrain wind. The small scale of cold air caused the significant changes in wind direction and speed, the bottom of the southeast jet and the northwest wind belt form a vertical shear area inclined upward which led to the cold-front type of low-level wind shear. The wind field around airports had been changed 1 h before the occurrence of wind shear. And the wind shear area was detected 10 min earlier than the report from aircraft which based on the plan position indicator model, the area where wind shear occurred was significant variations in the southeast wind speed, and also followed the movement of cold air to the west. During the movement of cold air, the southeast wind layer became thinner and retreated to the west. Near the glide path 07<sup>#</sup>. There was not only a sharp reduction of the frontal crosswind, but also a significant change in wind direction. The cold air was wedged from 25<sup>#</sup> to 07<sup>#</sup> during 08:30~10:25. The small-scale of cold air activity at low altitude was captured, and a backward of evolution process and structure was figured out, which showed that the pathway entering the airport from northeast, and issued the wind shear warning. The study is helpful to improve the meteorological service support capacity.

**Key words:** laser technique; wind light detection and ranging; low-level wind shear; flight safety; structural characteristics of wind field

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (41905114)

作者简介: 王楠 (1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事灾害性天气预报和气象管制融合的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: gaojh@cuit.edu.cn

收稿日期: 2022-05-17; 收到修改稿日期: 2022-09-19

## 引言

低空风切变对航空器的起飞爬升, 进近降落有着巨大的威胁<sup>[1-3]</sup>。低空风切变记录和预警都偏少<sup>[4]</sup>。要提高风切变的研究, 有效的探测设备不可或缺。测风激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 是新型

的风场探测手段,可弥补传统测风手段在低空风场探测能力上的不足<sup>[5-6]</sup>。测风激光雷达的探测效果在越来越多的机场进行了验证。测风激光雷达可以自动计算风切变参数,一定程度表明风切变的强弱。CHAN等人<sup>[7-10]</sup>对其算法进行检验,结果证实晴空低空风切变风指数效果较好。ZHANG等人<sup>[11]</sup>通过分析北京首都国际机场激光测风雷达的2000多个平面位置显示模式(plan position indicator, PPI)扫描数据,比航空器报告,多识别出了14个风切变案例。LI等人<sup>[12]</sup>利用距离高度显示模式(range height indicator, RHI)扫描风速数据,计算了下滑道600 m高度下各高度层的径向风速平均偏差,明确了风切变事件发生最频繁区域。LI等人<sup>[13]</sup>利用下滑道数据分析了广汉机场一次正侧风切变的发生发展特点,一定程度上揭示了小尺度强地面风形成原因。DAI等人<sup>[14]</sup>区分了丽江机场风切变类型,加深了预报员对晴空切变的认知。

另外,激光测风雷达在高原机场(西宁曹家堡机场)也得到了较好的应用和验证<sup>[15]</sup>。HUA等人<sup>[16]</sup>对一次典型风切变天气演变进行了监测,分析得出了风切变的结构、位置、高度和移动方向。HUANG等人<sup>[17]</sup>分析了一天当中不同时刻发生的低空风切变发现其成因和演变特征,风场结构均有所差异。激光测风雷达数据还可用于确定微下击暴流中冷空气加速下沉的高度和辐散气流水平尺度<sup>[18]</sup>,以加强低空急流的结构特征及其内部强度和脉动的分析<sup>[19]</sup>,拓宽了激光测风雷达的应用范围。

乌鲁木齐机场(国际代码ZWWW,海拔647.6 m)位于东、西天山之间东南-西北向峡谷的西北端开口处,峡谷从南到北逐渐收缩。这种特定的地形使得ZWWW机场在特定的环流背景下,会触发区域性东南大风。东南风的大小及停留高度会给航空器带来侧(垂直)风超标、中低空风切变和颠簸等影响,造成航空器的中止进近、复飞、备降。2015~2019年收到的话音方式航空器空中报告风切变事件中,低空风切变占比66%<sup>[20]</sup>。由于ZWWW机场没有高精度的风场探测设备,对风切变的研究一直滞留在出现频次的统计及认知上。

2021-11-26, ZWWW机场受强冷空气影响。2021-11-26T23:00~2021-11-27T18:30持续降雪天气,过程降水量8.00 mm,达到大雪量级。2021-11-26T09:44~10:20, 5架航空器在250 m~1500 m之间,由于风切变而中止进近、复飞,2架备降,3架重新进近落地。本文作者选取上述风切变过程进行探讨和分析,旨在加强

对ZWWW秋末冬初风切变成因及结构特点进行分析,保障飞机飞行安全保障,提高风切变预警和服务能力。

## 1 设备与方法

本文中使用的的是由西南技术物理研究所研制的FC-III型激光测风雷达<sup>[21]</sup>,是一部定位于低空风场3维探测和风切变监测预警的设备,于2021-09-09安装在ZWWW机场25#跑道下滑台附近运行使用,如图1所示。

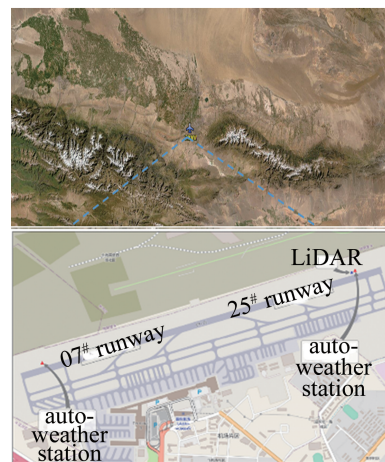


图1 乌鲁木齐地窝堡国际机场地形特点和测风激光雷达位置

Fig. 1 Geographical characteristics around Urumqi International Airport and installation location of LiDAR

测风激光雷达主要性能参数如表1所示。一次混合模式扫描耗时8 min~10 min,内容包括:PPI模式(3°,6°)、机场跑道方位的RHI显示模式、多普勒风廓线模式(Doppler beam swinging, DBS)和下滑道模式(glide path, GP)。该扫描方式全天候不间断运行,输出产品为风廓线(风速风向、垂直气流分布;正值为上升气流,负值为下沉气流);PPI/RHI径向风场分布图,其正径向风速远离雷达,负径向风速朝向雷达;下

表1 FC-III型测风激光雷达主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of wind LiDAR FC-III

item	value
average power	≤200 W
wavelength	1.55 μm
azimuth range	0°~360°
elevation angle rang	0°~180°
elevation resolution	≤0.1°
detection range	0.05 km~10 km
range resolution	≤30 m
time resolution	≤2 s
wind velocity/angle accuracy	≤0.50 m·s <sup>-1</sup> /≤10°

滑道迎头风,以观察者视角为标准,正值表示逆风,负值表示顺风;下滑道侧风,以观察者视角为标准,正值为右侧风,负值为左侧风。

### 2 天气背景及环流形势分析

采用欧洲数值预报中心的再分析资料(空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ )对风切变发生演变期间的天气背景进行分析,如图 2 所示。

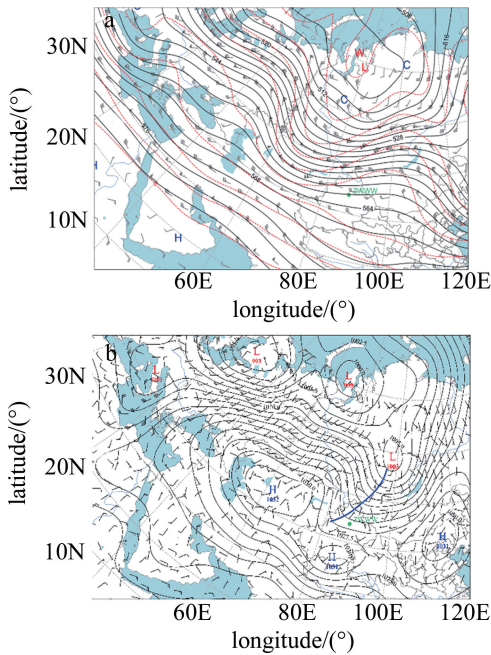


图 2 2021-11-26T08:00 时天气状态  
a—500 hPa 形势图 b—海平面气压场

Fig. 2 Weather situation at 2021-11-26T08:00

a—potential height with 500 hPa b—sea level pressure field

图 2a 为 2021-11-26T08:00 500 hPa 形势场。由图可知,欧洲脊持续东南衰退,中亚低槽加深发展过程中分裂南北两支,北支快速东移,南支缓慢加深东移分裂出  $-36^\circ\text{C}$  冷中心,影响新疆区域。配合海平面气压场(见图 2b)可知,冷高压主体压在威海以西,有明显的锋前减压,使得原本处于均压场的 ZWWW 机场 24 h 内减压 8 hPa,形成南高北低的地面气压场,形成东南大风形势。

### 3 利用激光测风雷达数据分析风切变结构特点及成因

2021-11-26T09:44 和 09:48 时,两架航空器分别报告进近至距 07#跑道入口 4 km、高度 250 m 左右,遭遇风切变导致复飞;10:19 时,一架航空器报告进近至距 07#跑道入口 5 km、高度 350 m 左右,遭遇风切变导

致复飞;10:20 时,两架航空器分别在 WW403 附近 ( $274^\circ$ 方向,距离跑道 29 km 处)、高度 1000 m 左右,WW406 附近 ( $254^\circ$ 方向,距离跑道 27.60 km 处)、高度 1800 m 左右遭遇风切变导致复飞;10:20 时,风切变水平探测范围超出激光测风雷达探测范围,暂不分析。

图 3 为风切变导致复飞前后时间段气象自动观测系统(automatic meteorological observation system, AWOS)间隔 60 s 气象要素图。其中点虚线为复飞时刻。如图 3a 所示,跑道两端风向风速不连续,变化较大:25#跑道为东北偏东风,风速  $2\text{ m/s} \sim 4\text{ m/s}$ ,超过顺风小于  $2.5\text{ m/s}$  标准,故使用 07#跑道运行。07#跑道为东南风,风向稳定,风速在  $6\text{ m/s} \sim 12\text{ m/s}$  变化。分析 07#跑道风场可知,两次风切变发生在风速锐减的时刻,1 min 风速减小  $4\text{ m/s} \sim 6\text{ m/s}$ 。10:10~10:25 时,跑道两端均出现了东南~偏东风逆时针旋转为东南~偏东风情况,25#跑道风速加大,07#跑道风向逆时针转换  $160^\circ \sim 180^\circ$ ,风速  $12\text{ m/s}$  下降至  $6\text{ m/s}$ ,直至 10:18,25#风速逐渐大于 07#风速  $2\text{ m/s}$ 。转风前后 07#跑道最大风矢量差达  $18\text{ m/s}$ ,航空器从右侧风转为左侧风。

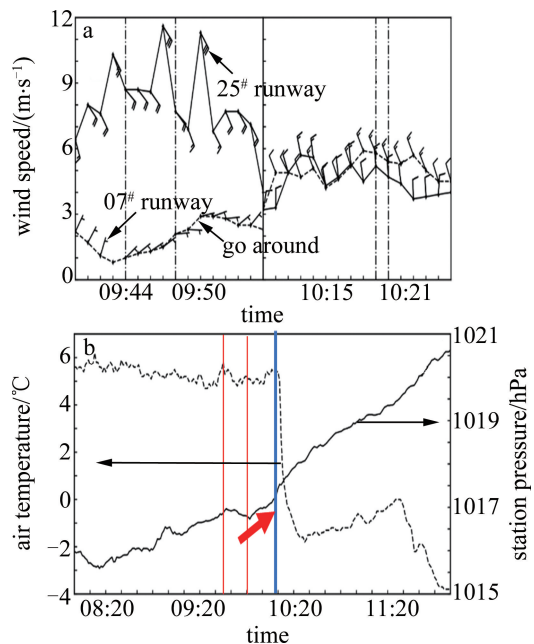


图 3 2021-11-26 乌鲁木齐机场

a—25#跑道和 07#跑道的风场图 b—07#跑道的气压-气温要素图

Fig. 3 Meteorological element charts of Urumqi Airport at 2021-11-26  
a—wind on runway 25# and 07# b—station pressure and air temperature on runway 07#

图 3b 显示了转风前后 07#跑道气压场和温度。第 1 次风切变发生在锋前增温减压,随后降温增压的时刻。08:15 以后,海平面气压总体上升,伴有微弱起伏,09:50 开始气压以  $0.1\text{ hPa/min}$  的速度上升,

20 min 后,温度以  $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  陡降,10:25 时稍加平稳缓和,于 11:30 继续下降。由此可见,09:50 左右,有冷空气入侵跑道,10:10 左右强度加强,引起风切变,导致航空器中止进近。结合形势场及 AWOS 近地面要素分析,判定该次风切变为冷锋型风切变。AWOS 探测数据只能表现冷空气入侵后的地面表现情况,结合激光测风雷达探测产品,能更好地分析冷空气变化特征及风切变的时空变化过程。

### 3.1 水平风场垂直分布

分析图 4 可知,2021-11-26 凌晨起,跑道上空出现 500 m 高度附近出现风速大于  $10\text{ m/s}$  的低空急流。02:00 时东南大风逐渐下压,600 m 以下出现东南大风核区,风速维持在  $14\text{ m/s}\sim 20\text{ m/s}$ ,并于 02:30~03:30 下传接地。04:00 时大风核逐渐上抬,地面转为偏东风,大风核区由 200 m 增厚至 1000 m。东南风核区经过几次上传,于 06:00 和 08:30 再次下压后,基本触地,并于 09:40 时抬升且厚度迅速减小,地面风由  $90^{\circ}$  向  $30^{\circ}$  逆转。10:20 时地面风维持在东北风向。12:00 开始 200 m 高度稳定在西北偏西风以后,冷空气加强渗透,偏西风层加厚加强。基于风廓线数据分析,冷空气在 09:40 左右开始影响 ZWWW,地面快于高空,锋面后倾。风切变刚好发生在东南风层明显抬升,地面风场急速转风,西北偏西风下传地面,冷空气加强渗透阶段。东南风急流底部与西北风风带形成倾斜向上的垂直切变区,引起起降航空器的复飞或备降。

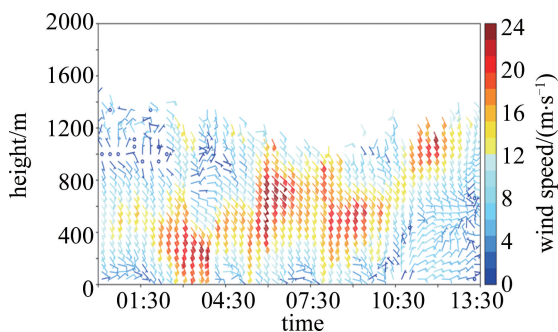


图 4 2021-11-26T00:00~14:00 风廓线探测风场

Fig. 4 DBS images measured by lidar at 2021-11-26T00:00~14:00

### 3.2 平面内风切变风场结构

结合第 3.1 节中的分析可知,有几个重要的时间节点:08:00~08:30 东南风层最后一次接地;09:40 左右冷空气开始渗透跑道;10:19 时航空器遭遇风切变;10:30 时 25<sup>#</sup> 和 07<sup>#</sup> 跑道均转为西北风,跑道转为锋面前渗透的冷空气控制。

接下来通过分析 PPI 模式探测数据,探求平面内风场转换特征。图 5 为 2021-11-26T08:08~10:26 主

要时间节点的径向速度图和水平风场图。黑色方框代表机场跑道,左侧为 07<sup>#</sup> 跑道入口及距离跑道入口  $1.852\text{ km}\sim 5.556\text{ km}$  区域,右侧为 25<sup>#</sup> 跑道入口及距离跑道入口  $1.852\text{ km}\sim 5.556\text{ km}$  区域。

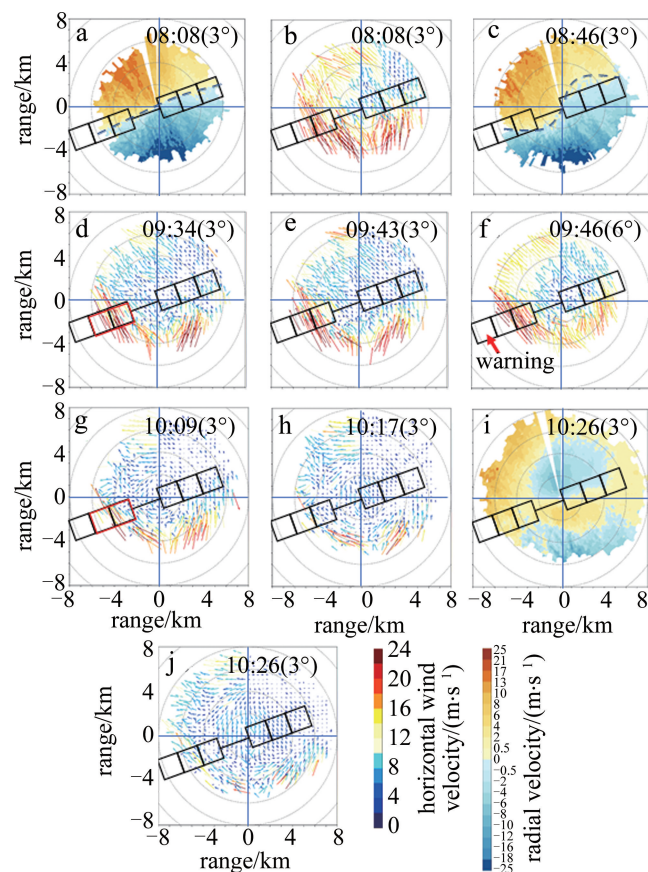


图 5 2021-11-26 风切变过程中 PPI 模式图

a, c, i—径向速度 b, d, e, f, g, h, j—水平风场

Fig. 5 Diagram of PPI model at 2021-11-26

a, c, i—radial vector b, d, e, f, g, h, j—horizontal wind

图 5a 显示 08:08 ( $3^{\circ}$ ) 径向风,机场周边 6 km 范围内零径向速度线较为平直,为较为一致的东南风,但风速空间分布不均。图 5b 显示风速呈现由南向北、由西南向东北递减特征,且在跑道上风速相差较大。图 5c 显示 08:46 ( $3^{\circ}$ ) 径向风,零径向速度线在雷达探测范围内出现 S 型旋转。图 5d 显示 09:34 ( $3^{\circ}$ ) 零径向速度线 S 型旋转更为明显,这表示近地面层存在增强的暖平流,且平面内东南风减弱西退,在 25<sup>#</sup> 跑道接地端转为偏东风,  $3^{\circ}$  PPI 平面风场转换比  $6^{\circ}$  PPI 明显,低层暖平流比高层暖平流强。配合 AWOS 气压场对应时刻的短暂起伏(见图 3b),有理由推断有小尺度扰动向 ZWWW 移近,且冷空气由底层渗透,这与 3.1 节中的结论一致。在 07<sup>#</sup> 下滑道  $1.852\text{ km}\sim 3.704\text{ km}$  处有风速不连续区(红色框内),航空器沿 07<sup>#</sup> 下滑道进

近过程中,右侧风骤减,容易引起风切变。值得注意的是,09:44~09:48 航空器报告的遭遇风切变位置在距离 07#跑道入口 4 km、高度 250 m 左右,即为红框区。所以 PPI 模式比航空器报告提前 10 min 左右探测到风切变区域。

图 5e 显示 09:43(3°)水平风场,25#端风场继续向东偏转并向 MID 端移近,07#下滑道风速切变区稳定存在,强度不变。图 5f 显示 09:46(6°),在距离 07#下滑道 5.556 km(距离 07#跑道入口 3.8 km,高度 650 m)区域触发了中度水平风切变告警,与航空器报告时间拟合好。

10:00(3°) PPI 显示,偏东风继续由 25#跑道向 07#跑道推进,在跑道中间出现东南风向东北风转换,距离雷达中心 4 km 东北侧风场转为偏北或西北风。图 5g 显示 10:09(3°)~10:12(3°),雷达北侧偏北风继续加强,且范围 PPI3°大于 PPI6°平面,跑道 25#端至中端(middle, MID),逐渐转为东北偏北风,此时 07#端仍然为偏南风。在距离 07#跑道下滑道 1.852 km~3.704 km,存在风向辐合和风速变化,强度有所减弱。按照东南大风层西撤,北风推进的趋势,水平风切变区西移至距离 07#跑道 5.556 km 区(超出该时段探测范围),结合 10:19 的风切变报告,推测具有合理性。图 5h 显示 10:17(3°)PPI 图上,跑道以北 4 km 区域内全部转为了偏北风,6° PPI 图上 2 km 以北为偏北风。图 5i~图 5j 显示了 10:26(3°),PPI ,6 km 范围内风场转为偏北风,结合风廓线,可知东南风层减弱抬升。可以认为此时冷锋前冷空气基本渗透了 07#跑道及其 5.556 km 下滑道。

冷空气是以楔形状态自东北偏北方向西或西南移动,由低到高逐渐影响 25#下滑道及跑道端,后推进至 MID 端,最后影响 07#跑道端及其下滑道。在冷空气推进的过程中,东南大风层抬升减弱西撤,在 07#下滑道 1.852 km~5.556 km 进近区形成由风速骤减、风向辐合导致的风切变。激光雷达在 ZWWW 机场的探测准确性在本次风切变中得到验证。

### 3.3 侧风风切变及下滑道风场结构

分析 PPI 图可知,风切变发生在风场辐合和风速切变区,且采用 07#下滑道进近过程中,有右侧风的显著变化。由本节中的分析下滑道数据,帮助表征空间气流垂直结构的特征。结合雷达安装位置,07#跑道方向 2.7 km 之内为跑道,之后为 07#跑道下滑道。

分析侧风情况(见图 6a)可知:10:32,跑道延伸至 07#下滑道侧风均为右侧风;09:32~09:41,距离雷达

1 km 以内侧风风速变化不大,大风核心区由距离雷达 1.2 km 西退至 2.4 km,佐证了东南风层抬升且西退的结论,冷空气推进,对跑道产生影响;09:41~09:49,风切变前后,跑道及 07#下滑道一直处于强右侧风影响;09:32,3 km 里内右侧风大于 12 m/s,为强东南风;09:49,2.5 km 以内的侧风稳定减小,说明风场由东南明显转向偏东;10:15,1.7 km 以内的侧风减小至 5 m/s 以内;10:23,500 m 以内的风场进一步向东向北逆时针旋转;10:32,1.2 km 以内转为西北偏北风,冷空气渗透完毕。这与第 3.2 节中的结论一致。

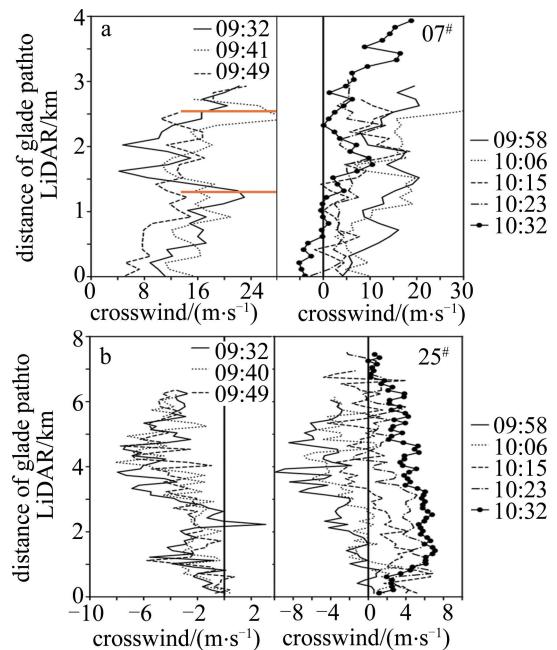


图 6 2021-11-26 不同时刻的下滑道侧风扫描

Fig. 6 Crosswind information of glide path at 2021-11-26

再分析图 6b。09:32,25#下滑道为稳定的左侧风,同距离同高度比 07#端风速小 10 m/s~16 m/s 不等,佐证了 PPI 图形中风速由东北向西南增大的结论,且 25#方向风向更偏东,侧风分量较小;09:40,出现了左侧风减小的趋势,尤其 4 km 以内减小明显;09:58,1 km 以内开始出现右侧风,东北偏东风开始影响近地面层;10:06,波动调整;10:15,转为稳定的右侧风,范围从 3 km 扩大到 4 km;10:32,右侧风稳定,范围扩大至距离雷达 7 km 处。由此可见,冷空气导致的风向逆转先影响 25#跑道再影响 07#跑道。

图 7 中的观测模式如下:RHI,方位角为 70°;俯仰角为 0°~180°;俯仰步长为 2;探测范围为 200 m~11858 m;距离门长度为 100 m;距离库数为 117。图 7a 显示 08:06 时,跑道上空东南大风核心区位于 500 m~1000 m 高度层,500 m 以下,25#跑道以东 3 km~5 km

范围内,夹杂正径向风,说明该区域风向大于 $150^\circ$ ,更为偏南,同样的特征在距离雷达的07#方向4 km~6 km也有所体现。图7b显示09:32时,东南风层变薄,大风区西撤。图7c显示09:41时,在07#下滑道附近,150 m~370 m高度出现了径向风速的骤减及正负转换,说明在07#下滑道过程中,风场垂直变化较大,结合PPI及下滑道侧风分析,该风切变是侧风风切变及风向转换相结合引起的风切变;25#跑道方向,负径向风由东北偏东方向沿箭头方向向跑道推进,验证了冷空气由底层渗入后倾明显的结构特点。图7d显示从10:06开始,07#下滑道500 m以下经向风转换继续加强,佐证冷空气由25#跑道楔形渗透,07#下滑道风切变区继续维持。图7e显示从10:24开始,渗透更为明显,25#跑道下滑道300 m下风向基本转为 $340^\circ\sim 010^\circ$ ,进一步向07#跑道推进,跑道上空径向风总体减弱。

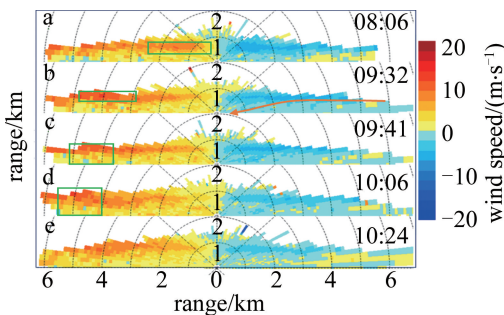


图7 2021-11-26风切变过程中RHI模式的径向速度

Fig. 7 Radial velocity of RHI mode at 2021-11-26

## 4 结论

(1)特定的地形风作用下,小尺度冷空气扰动可造成显著的风向风速的变化,引发风切变。分析风廓线及AWOS资料可知:2021-11-26T09:44~09:48时的风切变,发生在跑道两端风向风速差异较大且07#端风速锐减的时刻;10:19时的风切变发生在气温骤降,气压陡升,跑道两端风场显著变化的时刻;冷空气加强渗透阶段,风场从地面向高空由东南~西北逆时针转换,形成东南风急流底部与西北风风带之间倾斜向上的垂直切变区,引起起降航空器的复飞或备降。

(2)分析PPI探测模式更加完善了风场结构。风切变发生前1 h,冷空气由雷达探测区域的北部和西北部,以楔形状态由低到高向西南方向推进。09:34时,距离07#下滑道1.852 km~3.704 km区域内出现东南大风风速骤减区,易引起风切变。该位置较好地对应了航空器报告位置,且比航空器报告提前10 min。随

着冷空气进一步渗透,10:12时,水平风切变区西移至距离07#跑道5.556 km区。结合10:19分的风切变报告,推测具有合理性。

(3)分析下滑道侧风演变情况同样验证了冷空气影响导致跑道及其下滑道风向逆转,风场转换由25#跑道向07#跑道推进。07#跑道及其下滑道由大于12 m/s强右侧风减弱到5 m/s以内,风速急速变化易引起风切变。下滑道RHI径向风场更为直观地显示了08:06~09:32期间东南风层变薄,大风区西撤过程。09:41时,在07#下滑道附近,150 m~370 m高度出现了径向风速的骤减及正负转换,风场垂直变化较大。补充了风切变成因:不但有侧风的风速变化,也有风向的大角度转换。激光雷达可捕捉到低空小尺度扰动,有助于较为全面地获取风切变演变过程的规律和细微结构。

## 参考文献

- [1] ICAO. Manual on low-level wind and turbulence[M]. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2005: 10-47.
- [2] FROST W. Flight in low-level wind shear; NASA contractor report 3678 [R]. Washington DC, USA: NASA, 1983: 1-70.
- [3] FUJITA T T, CARACENA F. An analysis of three weather-related aircraft accidents[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1977, 58(11): 1164-1181.
- [4] GULTEPE I, SHARMAN R, WILLIAMS P D, *et al.* A review of high impact weather for aviation meteorology[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(5): 1869-1921.
- [5] WANG Q M, GUO L L. Development of lidar in detection of low altitude wind shear[J]. Laser and Infrared, 2012, 42(12): 1324-1328 (in Chinese).  
王青梅,郭利乐.激光测风雷达在机场低空风切变探测中的应用[J].激光与红外, 2012, 42(12): 1324-1328.
- [6] THOBOIS L, CARIOU J P, GULTEPE I. Review of lidar-based applications for aviation weather[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(5): 1959-1976.
- [7] CHAN P W. Application of LiDAR-based *F*-factor in wind shear alerting[J]. Meteorologische-Zeitschrift, 2012, 21(2): 86-93.
- [8] CHAN P W, SHUN C M. Aviation applications of the pulsed Doppler LiDAR-experience in HongKong[J]. The Open Atmospheric Science Journal, 2009, 3: 138-146.
- [9] SHUN C M, CHAN P W. Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2008, 25(5): 637-643.
- [10] LEE Y F, CHAN P W. LiDAR-based *F*-factor for wind shear alerting: Different smoothing algorithms and application to departing flights[J]. Meteorological Applications, 2014, 21(1): 86-93.
- [11] ZHANG H W, WU S H, WANG Q C, *et al.* Airport low-level wind shear lidar observation at Beijing Capital International Airport[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96: 113-122.
- [12] LI X Y, YU Zh B, LIU D, *et al.* Low-level wind shear characteristic statistic of two runways of Beijing Capital International Airport based on strong wind background[J]. Infrared and Laser Engineer-

- ing, 2021, 50(12):294-302(in Chinese).
- 李肖雅,禹智斌,刘冬,等.大风背景下首都机场两条跑道低空风切变特征统计[J].红外与激光工程,2021,50(12):294-302.
- [13] LI Y T, LIANG M Z, LI Y H, *et al.* Analysis of an application of laser wind radar in Guanghan Airport[J]. Journal of Civil Aviation, 2021, 5(6):64-66(in Chinese).
- 李瑶婷,梁明增,李耀辉,等.激光测风雷达在广汉机场的一次应用分析[J].民航学报,2021,5(6):64-66.
- [14] DAI B B, HE M, YANG J X, *et al.* Causal analysis of a clear sky wind shear event at a plateau airport in southwest china using lidar data[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(4):589-596(in Chinese).
- 代冰冰,何敏,杨靖新,等.利用激光测风雷达判别机场晴空风切变事件成因[J].气象科技,2021,49(4):589-596.
- [15] FAN Q, ZHU X L, ZHOU D F, *et al.* Analysis of the wind field characteristics using the wind lidar in a typical plateau airport[J]. Laser Technology, 2020, 44(5):525-531(in Chinese).
- 范琪,朱晓林,周鼎富,等.激光测风雷达分析典型高原机场风场特征[J].激光技术,2020,44(5):525-531.
- [16] HUA Zh Q, LI Q, HUANG X, *et al.* Analysis of the typical application of laser wind measurement radar in aviation support[J]. Laser Technology, 2020, 44(5):600-604(in Chinese).
- 华志强,黎倩,黄轩,等.激光测风雷达在航空保障中的典型应用分析[J].激光技术,2020,44(5):600-604.
- [17] HUANG X, ZHENG J F, ZHANG J, *et al.* A study on the structure and characteristic of a low-level wind shear process that happened over Xining Airport[J]. Laser Technology, 2022, 46(2):206-212(in Chinese).
- 黄轩,郑佳锋,张杰,等.西宁机场一次低空风切变的结构和特征研究[J].激光技术,2022,46(2):206-212.
- [18] ZHANG T, LI Q, ZHENG J F, *et al.* A study on low-level wind shear caused by microburst using lidar and other data[J]. Laser Technology, 2020, 44(5):563-569(in Chinese).
- 张涛,黎倩,郑佳锋,等.激光测风雷达研究微下击暴流引发的低空风切变[J].激光技术,2020,44(5):563-569.
- [19] LI Q, ZHENG J F, ZHU K Y, *et al.* Structural characteristics of low-level jet based on wind lidar[J]. Laser Technology, 2020, 44(5):557-562(in Chinese).
- 黎倩,郑佳锋,朱克云,等.基于激光测风雷达的低空急流结构特征研究[J].激光技术,2020,44(5):557-562.
- [20] SUN Sh M, ZHANG Q, ZHU W N, *et al.* Analysis of typical low-level windshear events over the Urumqi International Airport[J]. Journal of Civil Aviation, 2021, 5(6):81-88(in Chinese).
- 孙少明,张茜,朱雯娜,等.乌鲁木齐国际机场典型低空风切变事件分析[J].民航学报,2021,5(6):81-88.
- [21] FENG L T, ZHOU J, FAN Q, *et al.* Three-dimensional lidar for wind shear detection and early warning in civil aviation airport[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5):0512001(in Chinese).
- 冯力天,周杰,范琪,等.应用于民航机场风切变探测与预警的三维激光测风雷达[J].光子学报,2019,48(5):0512001.