

拉萨贡嘎国际机场一次干季乱流天气过程测风激光雷达预警应用研究分析

朱国辉^{1,2}, 于人杰², 邹游¹, 央珍¹, 陈逸凡³, 蔡嘉玲³, 董彦达¹

¹民航西藏空管中心, 西藏 拉萨

²民航大连空管站, 辽宁 大连

³南京牧镭激光科技股份有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年9月17日; 发布日期: 2026年9月29日

摘要

2026年4月24日下午, 拉萨贡嘎国际机场发生了十余起航空器报告的低空风切变事件, 其影响在近年运行中较为罕见。本文利用跑道两端部署的Molas 3D三维扫描测风激光雷达的多模式探测数据、地面自动观测站10 m风资料及航空器空中报告, 对该次过程进行了系统复盘分析。结果表明: (1) 地面自动观测到的跑道端点风场变化与航空器报告相比滞后, 难以满足预警时效性要求; (2) 激光雷达PPI径向速度图清晰捕捉到进近通道内多个正负速度对的出现与移动, 与航空器报告的空间位置和发生时刻吻合良好; (3) DBS风廓线显示, 16时至19时跑道上空交替出现超过4 m/s的上升与下沉气流, 低层垂直交换显著增强, 为风切变的发生提供了有利的动量交换条件; (4) 基于单一3°仰角PPI数据重构的下滑道迎头风速廓线, 能够定量反映进近通道内顺风超标区域和风速突变位置, 以空间尺度 ≥ 600 m且单位距离(600 m)风速变化量的绝对值 ≥ 2.5 m/s (中度)或 ≥ 4.5 m/s (强烈)作为分级预警阈值, 可有效覆盖大部分复飞航班, 其中4.5 m/s阈值对应ICAO强烈风切变标准的下限。本研究验证了测风激光雷达在高原河谷机场风切变监测预警中的工程应用价值, 所提出的风切变识别指标可为后续业务化预警提供参考依据。

关键词

低空风切变, 测风激光雷达, 拉萨贡嘎国际机场, 下滑道迎头风, 风切变识别

A Study on the Detection Characteristics of Wind-Measuring Lidar during a Turbulence Event in the Dry Season at Lhasa Gongga International Airport

文章引用: 朱国辉, 于人杰, 邹游, 央珍, 陈逸凡, 蔡嘉玲, 董彦达. 拉萨贡嘎国际机场一次干季乱流天气过程测风激光雷达预警应用研究分析[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(9): 1360-1373. DOI: 10.12677/ag.2026.169121

Guohui Zhu^{1,2}, Renjie Yu², You Zou¹, Zhen Yang¹, Yifan Chen³, Jialing Cai³, Yanda Dong¹

¹Xizang Air Traffic Management Center of CAAC, Lhasa Xizang

²Dalian Air Traffic Management Station of CAAC, Dalian Liaoning

³Nanjing Movelas Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: August 4, 2026; accepted: September 17, 2026; published: September 29, 2026

Abstract

On the afternoon of 24 April 2026, more than ten low-level wind shear incidents were reported by aircraft at Lhasa Gongga International Airport, representing an abnormal weather phenomenon rarely encountered in recent operational years. Based on the multimodal observation data of Molas 3D scanning LiDAR (wind light detection and ranging) installed at both runway ends, 10-meter wind records from automatic surface observation stations, and aircraft pilot reports, this paper systematically analyzes the wind shear event process. The results show that: (1) Wind field variations observed by ground automatic stations lag aircraft reports, which cannot meet the timeliness requirement for operational wind shear early warning; (2) PPI (Lidar Plan Position Indicator) radial velocity images clearly capture the generation and migration of multiple positive and negative velocity pairs within the approach corridor, which are highly consistent with the spatial positions and occurrence times recorded by aircraft reports; (3) DBS (Doppler Beam Swinging) wind profiles indicate that alternating updrafts and downdrafts exceeding 4 m/s prevailed over the runway from 16:00 to 19:00. The remarkable enhancement of low-level vertical exchange provided favorable momentum conditions for wind shear development; (4) The glide-path headwind profile reconstructed from 3° elevation-angle PPI data can quantitatively identify wind-speed-exceeding areas and abrupt wind variation positions in the approach segment. Taking spatial scale (≥ 600 m) and unit-distance (600 m) wind speed variation (≥ 2.5 m/s for moderate, ≥ 4.5 m/s for severe) as identification criteria, the proposed method can effectively cover most wind shear-induced go-around cases. The severe threshold of 4.5 m/s corresponds to the lower bound of ICAO's severe wind shear criterion. This study verifies the practical application capability of LiDAR in wind shear monitoring and early warning at high-altitude valley airports. The optimized wind shear identification indices can provide technical references for future operational early warning services.

Keywords

Low-Level Wind Shear, Wind Lidar, Lasa Gonggar Airport, Glide-Path Headwind, Wind Shear Identification

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

航空气象的低空风切变是指距地面约 600 m 以下风矢量在空间上的快速变化, 具有尺度小、生命史短、突发性强等特点, 被公认为飞机起降阶段的“隐形杀手”[1]。在本文中, “风切变”特指飞机沿飞行轨迹所经历的风矢量(主要为水平风)在空间上的急剧变化, 其直接影响航空器的空速和升力; “湍流”则指叠加在平均风场上的随机脉动, 表现为颠簸, 通常与风切变伴随但物理机制不同。两者在探测和预

警上既有联系又有区别, 本文将在后续分析中分别讨论。在起飞和着陆过程中, 风切变可在极短时间内改变航空器的空速和升力, 导致航迹偏离、颠簸乃至坠机等严重事故, 其探测与预警一直是航空气象领域的世界性难题[2]。

拉萨贡嘎国际机场位于“世界屋脊”青藏高原, 海拔为 3570 m, 属于典型的高高原机场。由于地处雅鲁藏布江河谷之中, 特殊的地形条件和下垫面共同作用, 使得机场上空风场环境极为复杂, 低空风切变频发, 对飞行安全和航班正常运行构成持续威胁[3] [4]。传统的测风手段, 如地面自动气象观测站(仅能获取单点近地面风场)、多普勒天气雷达(对晴空风切变探测能力不足)和风廓线雷达(水平风切变监测能力有限), 在高原复杂地形条件下均存在不同程度的局限性。近年来, 测风激光雷达凭借其高时空分辨率、多扫描模式灵活切换、晴空条件风场精细探测等优势, 已在风切变较多的机场低空风切变监测预警中展现出不可替代的作用[5]-[8]。此外, 国内其他机场如北京大兴[9]、银川[10]、首都[11]等也开展了基于激光雷达的风切变探测研究, 多种风切变识别算法[12] [13]被提出并投入业务验证。为了提升拉萨贡嘎国际机场低空风切变的探测和预警能力, 民航西藏空管中心在 10 L/28R 跑道两端分别部署了 Molas 3D 型测风激光雷达, 采用多种扫描模式协同探测, 以期实现对本场周边(尤其是进近区域)风场的高时空密度监测。

2026 年 4 月 24 日下午, 本场发生了十余起航空器报告, 其频次之高、影响范围之广, 在近年运行中较为罕见。分析 23~24 日形势场, 受高空槽及槽后强冷平流影响, 拉萨贡嘎国际机场及周边区域风场明显的气旋式切变, 随着短波槽过境, 上游冷空气入侵, 使得高空温度大幅下降, 动力抬升作用和高原热力条件配合, 容易诱发阵形降水和风切变, 这是一次典型的伴随冷平流的高空短波槽过境天气过程。本文基于此次案例, 综合利用跑道两端测风激光雷达的多模式探测数据、航空器空中报告记录及自动观测站资料, 对风切变事件的发生背景、演变过程和探测特征进行系统复盘分析, 旨在揭示高高原机场低空风切变的发生规律, 评估测风激光雷达在极端风切变事件中的监测效能, 并为后续预警指标的建立和探测算法的优化提供典型个案例证。

2. 资料与方法

为更加全面地对此次晴空低空风切变进行研究, 本文主要采用激光测风雷达探测资料、自动观测站 10 m 风数据, 航空器空中报告, 对拉萨贡嘎国际机场 2026 年 4 月 24 日的风切变天气过程进行分析与总结, 后续文中数据均采用北京时。

2.1. 地面自动观测站

拉萨贡嘎国际机场具有两条方向平行的跑道, 分别为 10L/28R(新跑道)与 10R/28L(老跑道), 航空器起降使用 10L/28R 跑道。

两条跑道的六个地面自动观测点的位置如图 1 所示。本文采用各测站 10 m 风的 2 分钟平均风速、风向及逆风分量数据, 采样间隔为 15 s。该资料用于对地面风场特征开展时间序列分析。

2.2. 测风激光雷达

两部 Molas 3D 三维扫描测风激光雷达于 2024 年 1 月、2024 年 7 月先后部署在跑道西端(10L)、跑道东端(28R)的接地点附近。激光雷达均采用组合扫描模式, 循环执行 PPI、RHI 以及 DBS 扫描, 循环周期约 5 分钟。本文利用 DBS 风廓线数据分析跑道两端上空的三维风场结构, 并进一步计算湍流耗散率(EDR); 利用 3°俯仰角 PPI 径向速度分析本场的水平风场特征以及重构相应下滑道的迎头风速廓线。



Figure 1. Locations of wind measurement equipment at Lhasa Gongga International Airport. The red dots represent the auto-matic surface weather observation system, and the blue squares represent the Molas 3D wind lidar
图 1. 拉萨贡嘎国际机场的测风设备部署位置。红色圆点为地面自动气象观测系统，蓝色方块为 Molas 3D 测风激光雷达

Table 1. Statistics on aircraft incident reports at Lhasa Gongga International Airport on April 24, 2026
表 1. 拉萨贡嘎国际机场 2026 年 4 月 24 日的航空器不正常情况报告统计

序号	时刻	航班号	飞行阶段	使用跑道	类型	报告内容
1	15:55	某航 6271	最终进近	10L	顺风超标	在五边顺风超标，机组复飞，高度 30~60 米。15:59 机组决定二次进近。
2	16:01	某航 9844	最终进近	10L	顺风超标	在五边顺风超标，机组复飞，高度 152 米。16:07，机组决定二次进近。
3	16:22	某航 6271	最终进近	28R	风切变	在五边遭遇风切变，机组复飞，高度 152 米。16:32，机组决定返航。
4	16:22	某航 9844	进近	28R	主动规避	由于前机报告风切变，机组中止进近，高度 1400 米。16:28，机组决定备降。
5	16:24	某航 5825	下降	-	主动规避	由于前机报告风切变，机组中止进近，高度 3600 米。16:27，机组决定返航。
6	16:25	某航 4420	巡航	-	高空颠簸	在 IGELA 西北 280°约 30 公里处，遭遇中度颠簸，海拔 11,000 米。17:30 正常落地。
7	16:27	某航 9986	进近	28R	顺风超标	在五边顺风超标，机组复飞，高度 950 米。16:50，机组决定备降。
8	16:29	某航 3253	进近	28R	主动规避	由于前机报告顺风超标，机组中止进近，高度 1450 米。16:54，机组决定备降。
9	16:45	某航 4123	巡航	-	主动规避	因本场顺风超标，机组决定备降。
10	18:12	某航 9996	最终进近	28R	风切变	在五边遭遇风切变，机组复飞，高度 60~90 米。18:35，机组决定二次进近。
11	18:17	某航 2746	最终进近	28R	风切变	在五边遭遇风切变，机组复飞，高度 60 米。18:35，机组决定二次进近。
12	18:19	某航 6637	进近	28R	主动规避	由于前机报告遭遇风切变，机组中止进近，高度 1250 米。
13	18:57	某航 2746	最终进近	28R	风切变	二次进近在五边遭遇风切变，机组复飞，高度 270 米。19:01，机组决定备降。
14	18:58	某航 9996	进近	28R	主动规避	二次进近过程因前机报告风切变，机组中止进近，高度 1250 米。19:11，机组决定备降。
15	18:59	某航 3502	进近	28R	主动规避	因前机报告风切变，机组中止进近，高度 1750 米。19:03，机组决定备降。
16	19:29	某航 9878	最终进近	28R	风切变	在五边遭遇风切变，机组复飞，高度 270 米。19:58，机组使用 10L 跑道正常落地。
17	19:30	某航 8635	进近	28R	主动规避	因前机报告风切变，机组中止进近，高度 1400 米。19:48，机组决定返航。
18	19:31	某航 9914	进近	28R	主动规避	因前机报告风切变，机组中止进近，高度 2550 米。20:04，机组使用 10L 跑道正常落地。

2.3. 航空器不正常情况报告

4月24日下午至晚间,一共接收到18份来自计划进场机组的不正常情况报告,如表1所示。图2展示了机组发出报告的空间位置与对应时刻,航空器主要集中于两个时间段:

- (1) 15:55~16:45: 共9份报告。其中3起为机组在最终进近阶段直接遭遇天气影响(顺风超标2起、风切变1起);其余与本场距离超过15 km,主要是得知前机报告后主动采取中止进近以规避风险。
- (2) 18:12~19:31: 共9份报告。其中4起为机组在最终进近阶段直接遭遇天气影响,均为风切变;其余与本场距离超过15 km,均为主动中止进近。

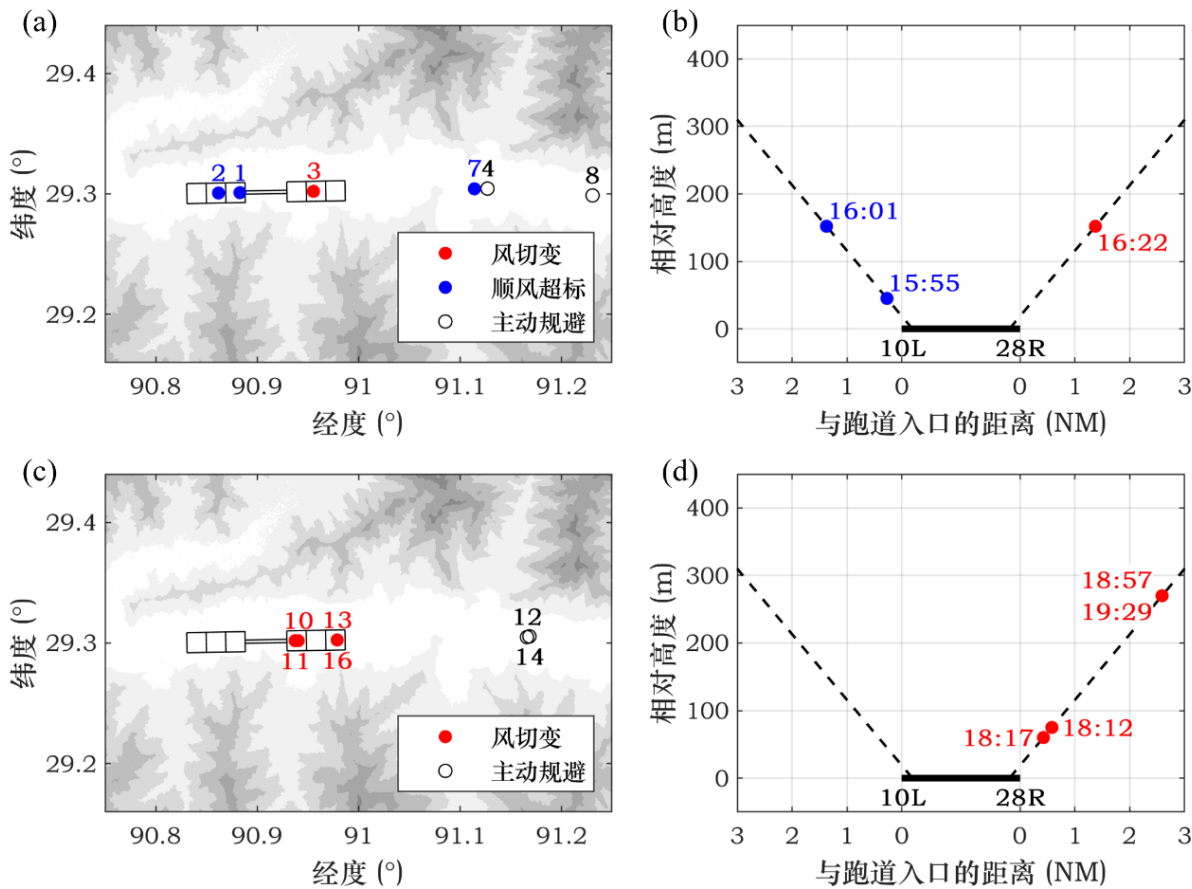


Figure 2. Locations of aircraft reports; the numerical labels correspond to the report numbers in Table 1. (a)~(b) Crew reports from 15:55 to 16:45; (c)~(d) Crew reports from 18:12 to 19:31

图 2. 航空器报告的发生位置, 数字标号对应为表 1 中的报告序号。(a)~(b) 15:55~16:45 期间的机组报告; (c)~(d) 18:12~19:31 期间的机组报告

3. 风切变天气过程的风场特征分析

2026 年 4 月 24 日下午至晚间的风切变天气过程具有突发性、间歇性、持续时间较短等特点。航空器报告主要集中在两个时间段内发生, 分别为 15:55~16:45 与 18:12~19:31。在过程间隙, 有部分航班能够正常起飞或落地。本场跑道运行方向因航空器报告与地面风场情况进行了多次切换: 16:02 以前使用 10L 跑道起降; 16:02~16:32 改为使用 28R 跑道; 16:32~16:57 切换为 10L 跑道; 16:57~19:49 再次使用 28R 跑道。

3.1. 第 1 个影响时段(15:55~16:45)的过程回顾

15:44 激光雷达 PPI 显示本场弱偏西风(0~4 m/s)。

15:48 10L 下滑道 1~2 NM 出现顺风区域(迎头风 < -4 m/s), PPI 径向速度负值区开始形成。

15:55 某航 6271 在 10L 五边报告顺风超标(高度 30~60 m), 复飞。此时地面自观 10L 端仍为弱风。

16:00 地面自观 10L 端西北风突增至 4~6 m/s, 滞后报告 5 分钟。

16:01 某航 9844 在 10L 五边报告顺风超标, 复飞。

16:02 管制切换跑道至 28R (基于地面风况和报告)。

16:15~16:25 PPI 显示跑道沿线出现多个正负速度对, 东南侧负值中心达 -12 m/s 并北移。

16:22 某航 6271 和某航 9844 (二次进近)在 28R 五边先后报告风切变(高度 152 m), 复飞/备降。

16:25 地面 28L/R 端出现 > 10 m/s 东南风, 滞后于报告。

16:32 管制再次切换至 10L。

16:45 最后一份报告(某航 4123 备降), 此后风向风速逐渐稳定, 航班恢复正常。

这一期间涉及最终进近阶段的复飞航班共 3 架次: 15:55, 某航 6271 (机型 319)使用 10L 跑道进近, 在五边由于顺风超标机组自行复飞, 高度 30~60 m 之间; 16:01, 某航 9844 (机型 319)使用 10L 跑道进近时遭遇顺风超标; 16:22, 某航 9844 使用 28R 跑道二次进近过程中遭遇风切变复飞。

图 3 展示了 15:00~17:00 期间本场六端点的地面自观 10 m 风的变化特征:

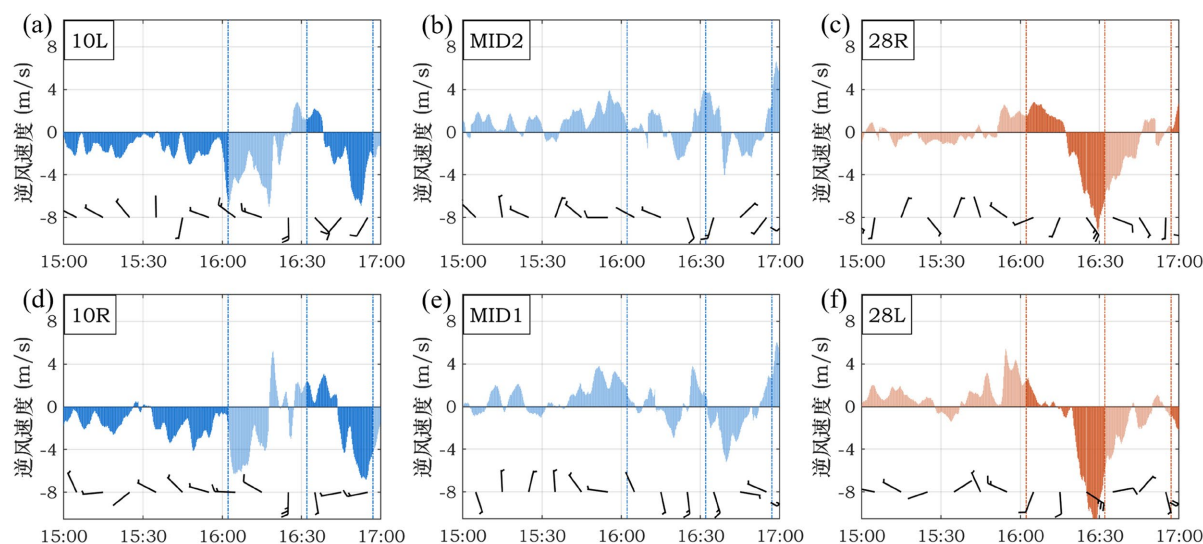


Figure 3. Time series of 10-meter wind speed from the ground-based automatic meteorological observation system (April 24, 2026, 15:00~17:00)

图 3. 地面自观 10 m 风的时间序列(2026 年 4 月 24 日 15:00~17:00)

16:00 以前, 本场跑道各端点的地面 10 m 风为 0~2 m/s 的弱偏西风, 风向变化范围较大。根据民用航空空中交通管理的规定, 干跑道的风速顺风分量应不大于 3.5 m/s, 在此期间 10L 端的顺风分量保持在 2 m/s 以内, 符合地面跑道运行规定。

16:00~16:02, 10L 出现 4~6 m/s 的西北风, 16:02~16:05, 10R 出现相似的西北风增强。在此期间顺风分量因西北风的增强而迅速增加至 5 m/s 以上, 超过地面跑道的顺风分量限制。该地面的风速变化滞后于机组报告 5 分钟。

16:25~16:30, 28L、28R 出现超过 10 m/s 的东南风, 使用跑道端的顺风分量再次超出限制。自观风速突变的时间点晚于 16:22 的风切变报告。

同期的激光雷达 3°仰角 PPI 径向速度分布如图 4 所示。激光雷达的径向速度定义为风矢量相对于雷达中心的径向投影分量, 规定为“来负去正”。

15:44 本场周边为 0~4 m/s 的弱偏西风。15:55~15:59 在 10L 进近通道 1 NM 附近出现了超过 -8 m/s 的径向速度负值区, 表明此时的西风分量明显加强。这一区域与 15:55、16:01 两起顺风超标报告的时空吻合。

16:15~16:25 本场的风场均匀性进一步变差。在此期间, 沿跑道方向出现了多个 PPI 径向速度的正负速度对, 尤其是东南侧出现了超过 -12 m/s 的负值中心并逐渐向北移动。这表明此时使用 28R 进近的飞机将经历偏西风 - 东南风 - 偏西风的剧烈变化。这与 16:22 风切变报告的对应性较好。

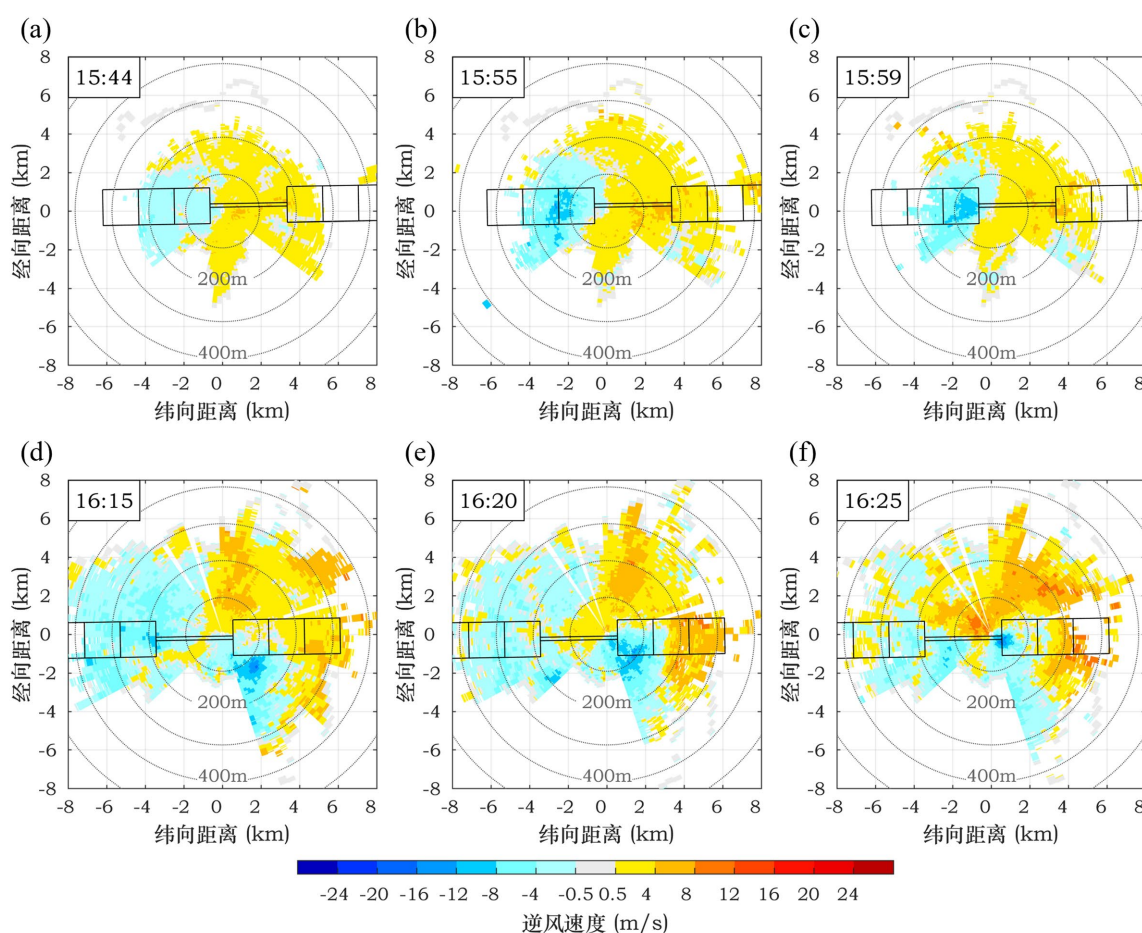


Figure 4. LIDAR PPI radial velocity map during the first impact period

图 4. 第 1 个影响时段期间的激光雷达 PPI 径向速度图

3.2. 第 2 个影响时段(18:12~19:31)的过程回顾

18:00 激光雷达 PPI 显示 28R 进近通道风场开始变得不均匀。

18:10~18:16 PPI 在 28R 五边 1 NM 处出现正负速度对, 指示东南 - 西南风切变。

18:12 某航 9996 在 28R 五边报告风切变(高度 60~90 m), 复飞。

18:17 某航 2746 在 28R 五边报告风切变(高度 60 m), 复飞。

18:20~18:30 地面 28L/R 端出现偏东风脉动, 稍滞后于报告。

18:35 前两机二次进近, 期间无新报告。

18:52~18:58 PPI 在 28R 五边 2 NM 处出现明显湍流斑驳色块。

18:57 某航 2746 二次进近再次在 28R 五边报告风切变(高度 270 m), 复飞备降。

18:58 某航 9996 二次进近因前机报告主动中止。

18:59 某航 3502 主动中止。

19:24~19:29 PPI 显示风场转为较均匀东南风, 仅 3 NM 处略有乱流。

19:29 某航 9878 在 28R 五边报告风切变(高度 270 m), 复飞。此后管制于 19:49 切换至 10L 跑道, 后续航班正常。

这一期间涉及最终进近阶段的复飞航班共 4 架次: 18:12, 某航 9996 (机型 A319) 使用 28R 跑道进近, 在五边遭遇风切变复飞, 高度 60~90 m; 18:17, 某航 2746 (机型 A319) 使用 28R 跑道进近, 在五边遭遇风切变复飞, 高度 60 m; 18:57, 某航 2746 使用 28R 跑道二次进近过程中在五边再次遭遇风切变复飞, 高度 270 m; 19:29, 某航 9878 (机型 A319) 使用 28R 跑道进近, 在五边高度 270 m 左右遭遇风切变复飞。

图 5 展示了 18:00~20:00 期间本场六端点的地面自观 10 m 风的变化特征:

10L、10R、MID2、MID1 在 2 小时内逐渐由 4~6 m/s 左右的西南风过渡至 4~6 m/s 东南风。28L、28R 则主要为偏南风 4~6 m/s, 18:20~18:30 期间出现了一定的偏东风造成风速突变, 这可能与 18:12、18:17 的两起风切变报告有一定对应。

图 6 的激光雷达 PPI 径向速度图更能反映这一时期水平风速分布的空间非均匀性。18:10~18:16, 28R 进近通道的 1 NM 区域出现了正负速度对, 表明此处出现了东南风至西南风的快速转变; 18:52~18:58, 28R~2 NM 的冷暖色块斑驳出现, 表明此处出现了较明显的湍流。以上均与相应时刻的航空器报告空间位置一致性较好。19:24~19:29 的速度空间分布逐渐变得均匀, 转为较平稳的东南风, 仅 28R~3 NM 及北侧略有乱流。

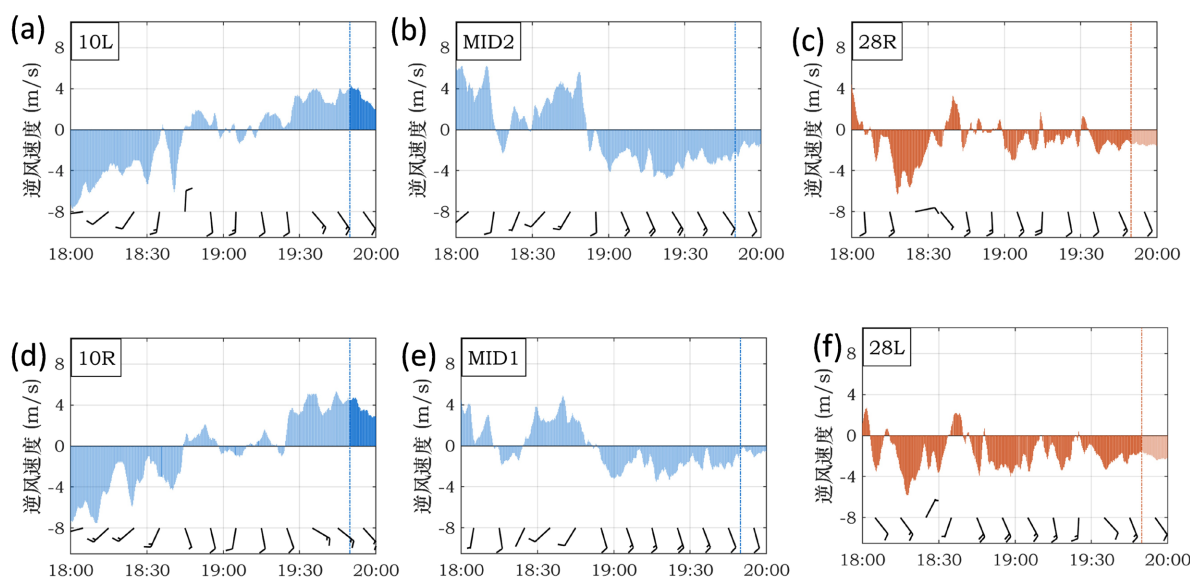


Figure 5. Time series of ground-based 10-meter wind (April 24, 2026, 18:00~20:00)

图 5. 地面自观 10 m 风的时间序列(2026 年 4 月 24 日 18:00~20:00)

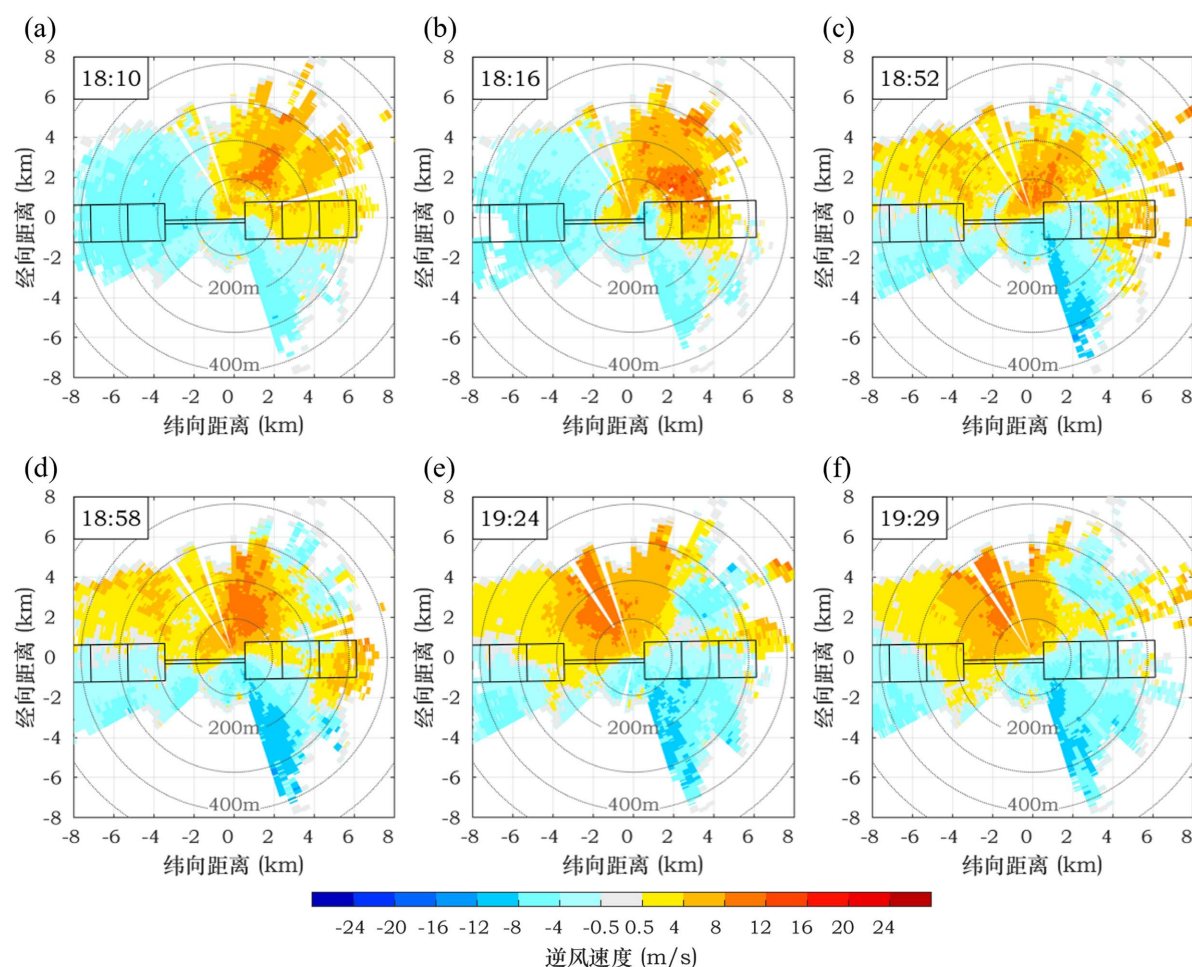


Figure 6. LIDAR PPI radial velocity map during the second impact period

图 6. 第 2 个影响时段期间的激光雷达 PPI 径向速度图

3.3. 风廓线变化特征

根据图 7, 4 月 24 日下午至晚间, 跑道两端上空主要为 4~8 m/s 的偏西风至西南风, 间歇性发生 8~12 m/s 偏南风, 水平风速和风向的变化较不稳定。

16:00 以前, 低层大气的垂直速度在 1 m/s 以内。16 时起, 10L 端上空率先出现了上升气流与下沉气流交替出现的特征, 最大垂直速度超过 4 m/s; 这一垂直速度波动至 17:10 略有减弱, 随后在 18:30 前后再次短暂增强; 19 时后整层大气的垂直波动趋于平稳。而 28R 端的垂直速度对显著加强则出现在 16:30~17:10, 17:30~17:50, 18:10~18:30 几个时间段内, 19 时后亦变得平稳。

16 时~19 时之间, 跑道两端上空交替出现明显增大的上升气流与下沉气流, 表明这一段时间低层大气的垂直交换显著增强, 表明大气在此时有较强的动量交换现象, 近地面的乱流、短时较强阵风发生可能与之有关, 这个时间段也是本次案例航空器报告集中发生的时期。

为进一步量化湍流强度, 本文基于 DBS 风廓线数据, 采用 Kolmogorov 谱模型计算了湍流耗散率 (EDR, $\epsilon^{1/3}$, 单位 $\text{m}^{2/3}\cdot\text{s}^{-1}$) [14]。计算方法为: 对 DBS 径向速度序列进行去趋势处理, 得到速度脉动, 然后拟合惯性子区谱斜率 -5/3, 计算谱密度水平, 进而求得 ϵ 。将 EDR 与航空器颠簸报告 (表 1 序号 6, 中度颠簸) 进行对比发现, 16:25 在 IGELA 附近 (海拔 11,000 m) 的 EDR 值约为 $0.4 \text{ m}^{2/3}\cdot\text{s}^{-1}$, 与 ICAO 中度颠

颠簸阈值(0.3~0.5)吻合;而在本场低空(500 m 以下),EDR 在 16:00~19:00 期间多次达到 0.3~0.6,表明存在中度及以上湍流,这与多起风切变报告中伴随的“颠簸”描述一致(如报告 3、10、11 等)。这一关联说明垂直速度的增强与湍流耗散率的增大具有同步性,进一步支持了 DBS 数据对飞行安全评估的参考价值。

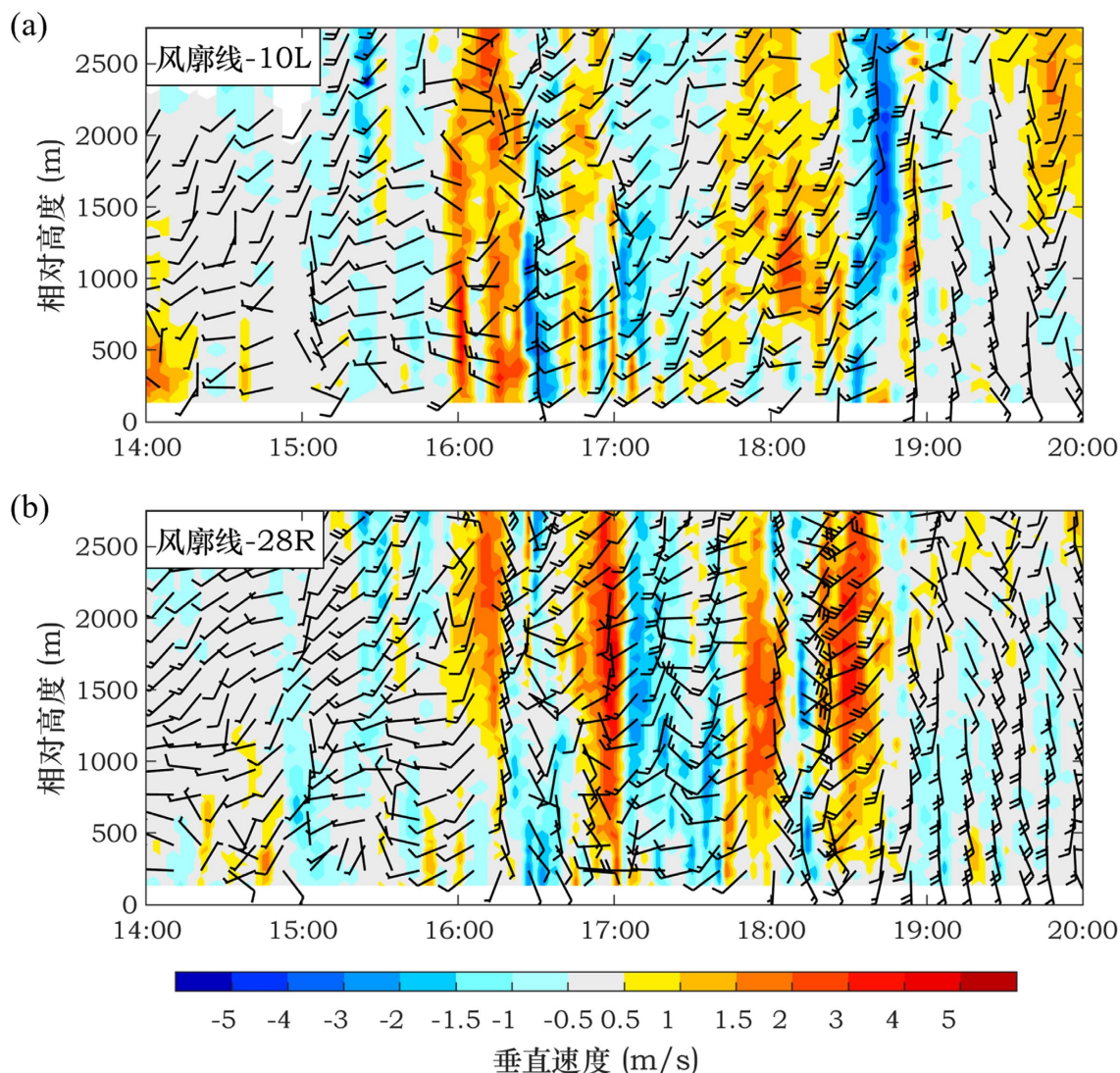


Figure 7. LIDAR DBS wind profile time-height plot. Black wind plumes represent horizontal wind vectors; shaded areas represent vertical velocity, with positive values indicating updrafts

图 7. 激光雷达 DBS 风廓线时间-高度图。黑色风羽为水平风矢量;填色为垂直速度,正值表示上升气流

4. 激光雷达风切变预警应用的分析

通过第 3 节对比分析可知,由自观系统探测的跑道各端点地面风场与相近时刻的航空器报告有所对应,但其响应往往滞后约 5 分钟。这一滞后在风切变快速生消的背景下难以满足航空器最终进近阶段对预警时效性的要求。相比之下,部署于跑道两端的激光雷达凭借 PPI 扫描模式,其水平探测距离可完整覆盖进近通道至少 3 NM 范围,能够更早地捕捉到上游来向的风场扰动。这表明激光雷达在复杂高原

机场的风切变预警具有工程应用价值，下文将讨论激光雷达预警应用的实现方法。

4.1. 下滑道迎头风速廓线重构算法

本重构算法仅使用单一 3°仰角 PPI 扫描数据，不涉及多个仰角的融合。具体步骤如下：

(1) 坐标映射：以激光雷达位置为原点，建立跑道坐标系，下滑道为与水平面成 3°倾角的直线，投影到 PPI 扫描平面上(即水平面)，得到下滑道在地面上的投影线。沿该投影线，提取各距离库的径向速度 V_r 。

(2) 迎头风速计算：飞机沿下滑道进近时，其所感受到的迎头风速(Headwind, HW)定义为沿航迹方向的风速分量，逆风为正。由于 PPI 扫描波束与水平面夹角为 3°，且波束指向近似平行于跑道方向(两者夹角小于 5°)，则径向速度 V_r 可近似为飞机航向方向的风速分量。对于激光雷达位于跑道端头的情形，进近方向正对雷达，则 $HW \approx V_r$ (当风沿跑道方向时)；若风向与跑道有夹角，则通过风向分解，将 V_r 投影到跑道方向，得到 HW。本场两端雷达布设位置与下滑道投影线基本重合，因此直接取 V_r 作为迎头风速的近似值，误差小于 0.5 m/s。

(3) 时间序列构建：每个 PPI 扫描周期(约 5 分钟)得到一条沿下滑道的 HW 廓线，进而绘制如图 8 的时间 - 距离图。

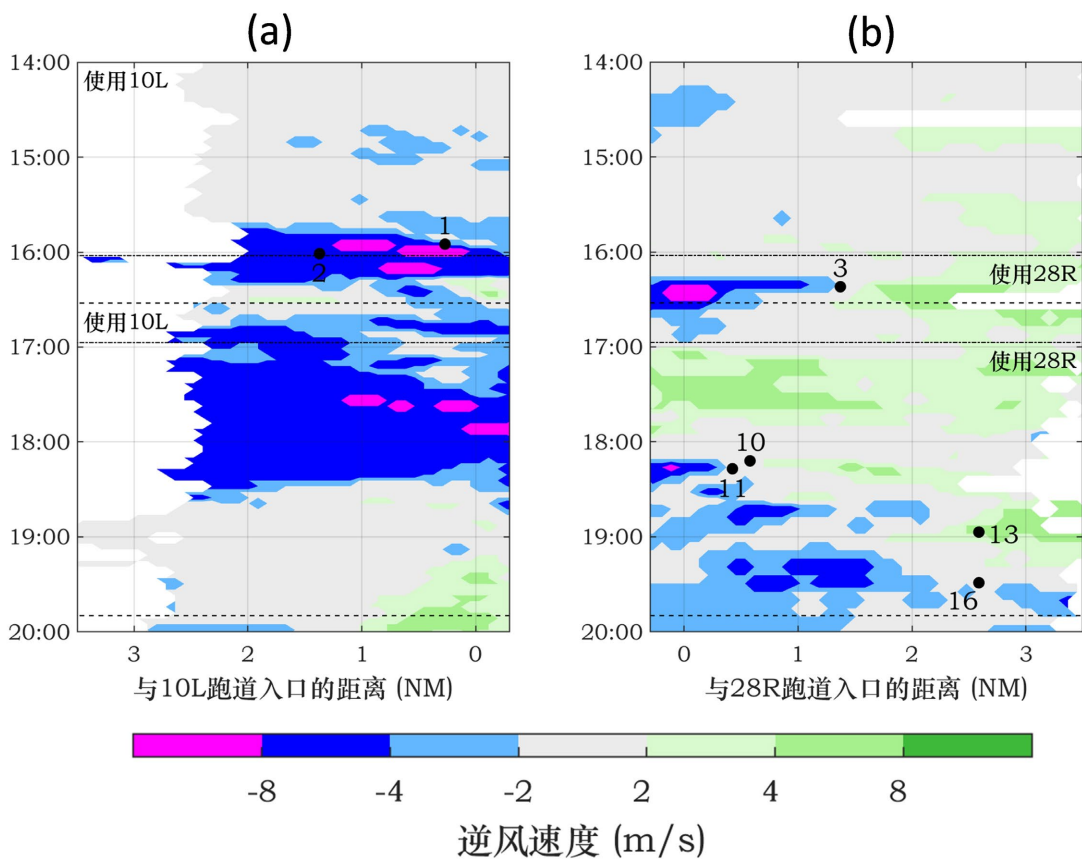


Figure 8. Time-dependent changes in the headwind velocity profile along the LiDAR glide path. Shaded areas represent headwind velocity (units: m/s), with positive values indicating headwind and negative values indicating tailwind. Numerical labels correspond to the serial numbers of the aircraft reported in Table 1

图 8. 激光雷达下滑道迎头风速廓线随时间的变化。填色为迎头风速(单位: m/s)，正值表示逆风，负值表示顺风。数字标号表示表 1 航空器报告的序号

该算法已被部分业务系统验证有效(Shun & Chan, 2008 [6]), 国内多个机场也采用了类似方法[11]-[13]。其优势在于计算简单、实时性强, 且单一仰角避免了多仰角数据同步和插值带来的误差。

飞机的最终进近通道与地面的倾角为 3° 。由于本场激光雷达分别位于 10L、28R 端下滑道接地点附近, 3° 仰角 PPI 模式在进近区域内会采集到多条与航向准平行的径向速度数据。根据 Shun 等人的方法[6], 本文分别利用两部激光雷达的 3° 仰角 PPI 数据重构了 10L 和 28R 下滑道的迎头风速廓线(图 8)。

航空器报告 1、2 均为顺风超标, 图 8(a)显示这两架次航班在最终进近过程中, 10L 下滑道 0~2 NM 范围内正处于超过 4 m/s 的顺风区域, 已超过跑道顺风限制条件, 不满足降落标准。从时间序列上看, 从 15:48 起在 10L 航道 1~2 NM 已形成超过 4 m/s 的顺风区域, 此后直至 18:45, 10L 几乎不具备合适的跑道起降条件。

4.2. 下滑道风切变预警应用

除了航空器报告 1 与 2, 其他出现在最终进近阶段的航空器报告均为在 28R 五边遭遇风切变。从图 8(b)可见这些航班复飞时并未处于明显的顺风区域, 但几乎都经历了从逆风到顺风转变的过程, 与报告内容较为一致。

迎头风速的变化量或变化率可以作为风切变识别依据, 但关于风切变的阈值标准目前尚无公认标准。国际民航组织(ICAO)建议暂行规定每 30 m 高度变化 5 节(≈ 2.5 m/s)、9 节(≈ 4.6 m/s)、13 节(≈ 6.7 m/s)作为中度、强烈、严重等级风切变的分类标准。国内研究较为先进的机场则以“速度斜坡”的风速变化量超过 15 节(≈ 7.7 m/s)作为告警标准, 明显高于 ICAO 标准。国内其他机场的研究[12] [13]也采用了风速变化量指标, 但阈值各有差异, 例如文献[15]在大连机场的冷锋型风切变案例中, 告警提前量约为 4~10 分钟。对于 3° 下滑道, 高度每变化 30 m 对应约 600 m 的航程, 因此本文采用单位航段距离(600 m)内的风速变化量的绝对值作为风切变识别标准。

本研究所提阈值(空间尺度 ≥ 600 m, 单位距离风速变化量绝对值 ≥ 2.5 m/s 或 ≥ 4.5 m/s)的确定依据如下:

(1) 空间尺度 600 m: 对应于 ICAO 标准中高度 30 m 变化对应的水平距离, 这是飞机在进近阶段约 2~3 秒的飞行距离, 足以对操控产生显著影响。同时, 本次案例中所有直接遭遇风切变的报告(除报告 16 外)其切变区域水平尺度均大于 600 m, 小于此尺度的零星扰动未造成复飞, 因此 600 m 可作为有效尺度阈值。

(2) 风速变化量 2.5 m/s 和 4.5 m/s: 2.5 m/s 对应 ICAO 中度风切变的下限(5 节), 4.5 m/s 对应强烈风切变的下限(9 节, 取整)。本次案例中, 报告 3、10、11、13 的最大每 600 m 变化量均达到 4.5~5.0 m/s, 而报告 16 的变化量约为 3.0 m/s, 低于 4.5 m/s 但高于 2.5 m/s。报告 16 仍被机组报告为风切变, 说明 2.5 m/s 的阈值可覆盖中度事件, 而 4.5 m/s 阈值则适用于强烈事件, 可用于分级预警。

(3) 对比研究典型的机场标准(7.7 m/s)和 ICAO 严重阈值(6.7 m/s), 本案例中的风切变强度总体属于中等到强烈, 尚未达到严重级别, 因此 4.5 m/s 作为本场强烈预警阈值是合适的, 而 2.5 m/s 作为中度预警阈值更具普适性。与其他算法[12] [13]的对比也支持这一分级方案。

图 9 展示了每 600 m 风速变化量在两端下滑道的分布情况。尽管报告 1 与 2 的内容为顺风超标, 但同时也处于风速变化较为剧烈的区域。报告 3 出现在顺风增加区域内, 其最大单位距离的风速变化量超过 4.5 m/s; 报告 10、11、13 同样出现在顺风增加区域内, 最大风速变化率相当。报告 16 的迎头风速变化则相对平稳, 与风切变报告内容略有出入, 这可能与机组对轻微颠簸的敏感性有关, 或存在其他未捕捉到的湍流分量, 但仍达到中度预警阈值。

风速变化区域的空间尺度从 150 m 到超过 2000 m 皆有出现。航空器报告大多出现在空间尺度超过

600 m 的切变区域内, 最大每 600 m 风速变化量达到 4.5 m/s 以上。在 15:48 以前、19:30 以后的进近通道区域内有零星散布的风速变化区域, 其空间尺度小于 600 m 或风速变化量低于 2.5 m/s, 风速变化的空间尺度和强度可能对航班的影响较小。若以空间尺度 ≥ 600 m 且风速变化率 ≥ 2.5 m/s 作为中度风切变预警触发条件, 以 ≥ 4.5 m/s 作为强烈预警触发条件, 则出现风切变的时间段可识别为 15:48~16:53 (10L、28R 均有出现)、18:05~19:19 (主要为 28R), 该预警时段能够包含大多数复飞航班。其中, 强烈预警信号主要出现在 16:15~16:25、18:10~18:17 和 18:52~18:58, 与最严重的复飞事件(报告 3、10、11、13)高度吻合。

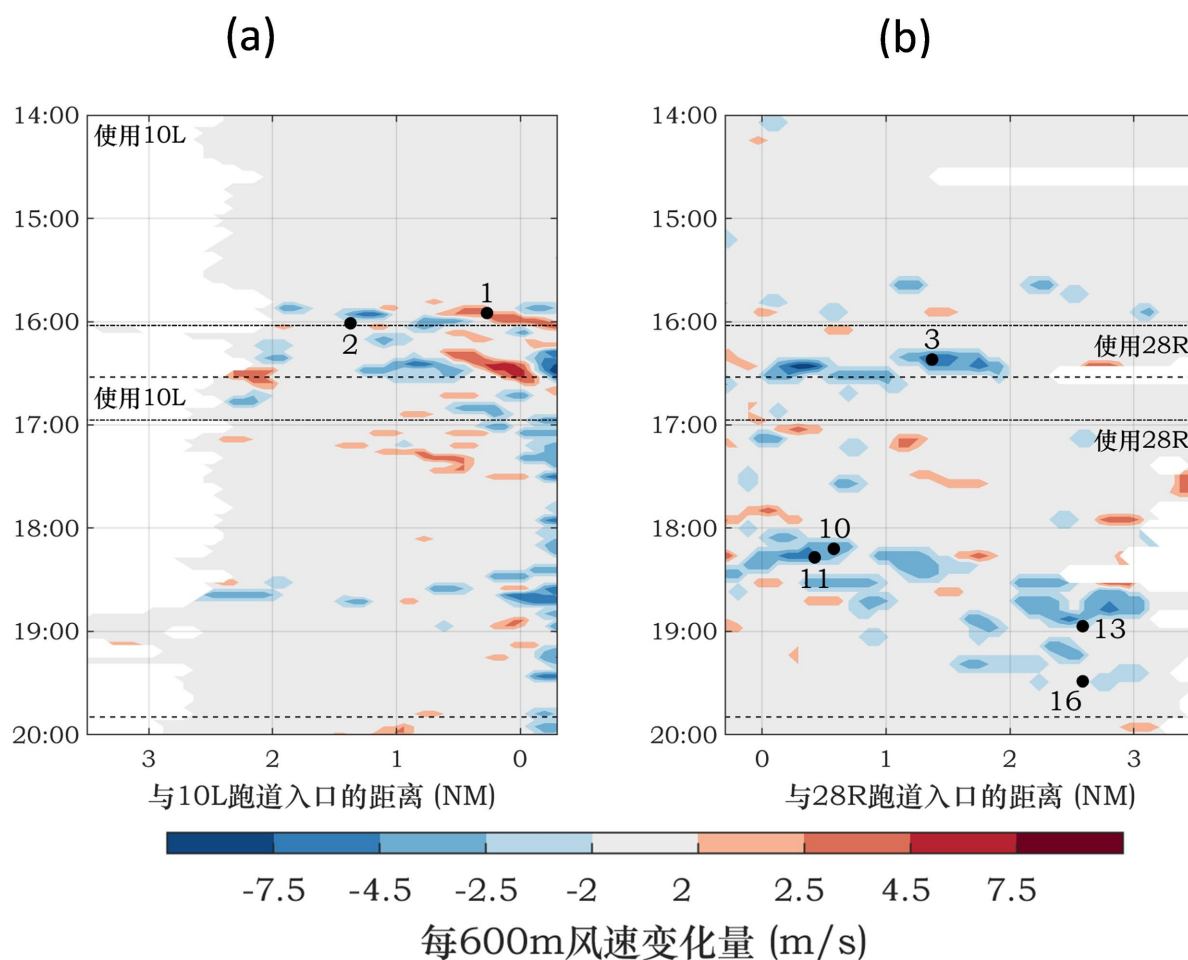


Figure 9. Time series of the change in headwind velocity per unit distance on the LiDAR glide path. The shading represents the change in headwind velocity every 600 m (units: m/s); positive values indicate an increase in headwind or a decrease in tailwind during the aircraft's flight, while negative values indicate a decrease in headwind or an increase in tailwind. The numeric labels correspond to the serial numbers of the aircraft reported in Table 1

图 9. 激光雷达下滑道迎头风速的单位距离速度变化量的时间序列。填色为每 600 m 的逆风速度变化量(单位: m/s), 正值表示飞机行进过程中逆风增加或顺风减小, 负值表示逆风减小或顺风增加。数字标号表示表 1 航空器报告的序号

5. 结论

本文基于跑道两端的测风激光雷达、地面自动观测站及航空器报告, 对 2026 年 4 月 24 日拉萨贡嘎国际机场一次低空风切变天气过程进行了综合分析, 主要得出以下结论:

- (1) 激光雷达 PPI 模式的监测效能。PPI 径向速度图能够清晰呈现进近通道内水平风场的空间非均匀

性。两次影响时段内, 进近区域先后出现多个正负速度对, 指示了偏西风与东南风之间的剧烈变化, 验证了激光雷达对低空风切变的可靠探测能力。

(2) DBS 风廓线揭示的垂直动力特征。16 时至 19 时, 跑道上空交替出现超过 4 m/s 的上升气流与下沉气流, 表明该时段低层垂直交换和动量下传明显加剧。由此计算的湍流耗散率(EDR)在本场低空达到 $0.3\sim 0.6\text{ m}^{2/3}\cdot\text{s}^{-1}$, 与航空器报告的中度颠簸吻合, 且 EDR 高值时段与风切变报告集中时段一致。这一垂直运动活跃期与航空器报告的集中发生时段基本对应, 为理解高高原机场低空风切变的形成机理提供了观测依据。

(3) 下滑道迎头风廓线的定量预警潜力。基于单一 3° 仰角 PPI 数据重构的下滑道迎头风速廓线, 算法简单、实时性强, 能够定量识别进近通道内的顺风超标区域与风速突变位置。以空间尺度 $\geq 600\text{ m}$ 、单位距离风速变化量绝对值 $\geq 2.5\text{ m/s}$ (中度)和 $\geq 4.5\text{ m/s}$ (强烈)作为分级预警条件, 可有效覆盖本次过程中绝大多数复飞航班。阈值确定兼顾了 ICAO 标准与本次事件统计特征, 并与国内其他机场的算法结果[12][13][15]进行了对比, 在业务运行上有较强的指导性。

综上所述, 测风激光雷达多维度协同探测与风速重构, 能够在时间上提前识别风切变前兆信号, 在空间上精确定位危险区域, 有效弥补了传统地面观测的不足。本研究为高高原河谷机场低空风切变的监测预警提供了典型个案例证, 所提出的识别阈值和预警方法可为后续业务化应用提供参考。

参考文献

- [1] ICAO (2005) Manual on Low-Level Wind Shear and Turbulence. ICAO DOC 9817. <https://www.icao.int/flight-operations>
- [2] FAA (1998) Pilot Wind Shear Guide. Federal Aviation Administration, Advisory Circular No. 00-54. https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC00-54.pdf
- [3] 王慷, 周立, 陆雪蓓, 等. 测风激光雷达在拉萨贡嘎机场转风预报中的应用[J]. 激光技术, 2025, 49(3): 437-443.
- [4] 丁魅理, 文钟华, 周立, 等. 基于 FC-III型激光测风雷达的拉萨贡嘎机场一次晴空风切变特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2025, 45(3): 141-150.
- [5] 李炳华. 激光雷达在风切变预警中的业务应用[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2006 年年会“航空气象探测、预报、预警技术进展”分会论文集. 2006: 296-308.
- [6] Shun, C.M. and Chan, P.W. (2008) Applications of an Infrared Doppler Lidar in Detection of Wind Shear. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **25**, 637-655. <https://doi.org/10.1175/2007jtecha1057.1>
- [7] 王楠, 尹才虎, 刘晓明, 等. 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.
- [8] 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.
- [9] 孙丝雨, 张曦, 张志轩. 大兴机场激光测风雷达风切变告警时空特征及天气分型研究[J]. 海洋气象学报, 2025, 45(5): 36-44.
- [10] 白寒冰, 陈诚, 林彤. 基于 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 激光雷达的晴空风切变结构研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(10): 1497-1504.
- [11] 李肖雅, 禹智斌, 刘冬, 钟世斌, 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.
- [12] 刘晓明. 激光雷达识别低空风切变的方法和效果[J]. 激光技术, 2024, 48(3): 416-424.
- [13] 赵刚, 黄轩, 华志强. 激光雷达低空风切变告警算法的应用研究与分析[J]. 激光技术, 2025, 49(2): 203-209.
- [14] Smalikho, I.N., Köpp, F. and Rahm, S. (2005) Measurement of Atmospheric Turbulence by $2\text{-}\mu\text{m}$ Doppler Lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **22**, 1733-1747. <https://doi.org/10.1175/jtech1815.1>
- [15] 崔翠, 顾成恺, 周楠, 等. 激光测风雷达在冷锋式风切变监测与预报中的应用[J]. 中国民航飞行学院学报, 2026, 37(3): 46-51.