

基于PIREP的成都天府与双流机场低空风切变与颠簸特征分析

钟增华

民航西南地区空中交通管理局, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年4月17日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

低空风切变(WS)与航空器颠簸是影响进近与起飞阶段运行安全的关键危险天气。本文以近年两场航空器空中报告、两场年总簿、双流机场气候志、天府机场气候志为主要资料来源, 统计风切变与颠簸个例, 结合世界气象组织(WMO)对风切变及颠簸强度分级的说明, 对成都两机场(天府、双流)风切变与颠簸的发生频次、季节变化、垂直高度分布、成因类型与运行风险进行对比。结果表明: 两机场低空风切变均以对流过程为首要背景, 颠簸在成都区域呈明显冬半年高发特征, 与高空急流/槽及中低层切变系统有关, 夏季则更偏向对流颠簸。由于缺少地面专用探测与告警设备, 对风切变的探测仍依赖航空器空中报告(PIREP), 在业务结论基础上提出建立PIREP—雷达探空闭环, 强化跑道风场不连续监测。

关键词

低空风切变, 颠簸, 成都天府国际机场, 成都双流国际机场, 航空器空中报告

Analysis of Low-Altitude Wind Shear and Bumpiness Characteristics at Chengdu Tianfu and Shuangliu Airports Based on PIREP

Zenghua Zhong

Southwest Regional Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Chengdu Sichuan

Received: March 2, 2026; accepted: April 17, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Low-altitude wind shear (WS) and aircraft turbulence are the key hazardous weather conditions that affect the safety of operations during the approach and takeoff phases. This paper uses two recent aircraft in-flight reports, two annual general records, the climate chronicle of Shuangliu Airport, and the climate chronicle of Tianfu Airport as the main data sources to statistically analyze wind shear and turbulence cases. By combining the explanations of the World Meteorological Organization (WMO) on the classification of wind shear and turbulence intensity, the occurrence frequency, seasonal variations, vertical height distribution, cause types, and operational risks of wind shear and turbulence at the two airports (Tianfu and Shuangliu) in Chengdu are compared. The results show that low-altitude wind shear at both airports is mainly caused by convective processes as the primary background. Turbulence in Chengdu shows a significantly higher incidence in the winter half-year, which is related to the upper-level jet/stream and mid-low-level shear systems. In summer, it is more inclined to convective turbulence. Due to the lack of dedicated ground detection and alarm equipment, the detection of wind shear still relies on aircraft in-flight reports (PIREP). Based on the business conclusion, it is proposed to further establish a PIREP-radar sounding closed-loop system and strengthen the monitoring of runway wind field discontinuity.

Keywords

Low-Altitude Wind Shear, Turbulence, Chengdu Tianfu International Airport, Chengdu Shuangliu International Airport, Aircraft in-Flight Reports

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

风切变为相邻气层(或气柱)之间风速和/或风向存在差异的现象[1], 在民航业务中, 低空风切变是指发生在 500 米(1600 英尺)高度以下的平均风矢量在空间两点之间的差值[2], 其对低高度航空运行危害尤甚; 飞行中跨越不同气流层的边界会引起飞机加速、减速与升力突变, 并可能以颠簸形式体现。颠簸强度在国际民航业务中通常按轻度 - 中度 - 严重 - 极端进行分级[1], 其中中度颠簸可表现为姿态高度的中等变化但仍可控, 严重颠簸则可能出现短时失控、过载显著增大[3]。

2002 年, 香港国际机场安装了首台业务化运行的激光测风雷达[4]; 近年来, 国内外厂家的激光雷达分别在昆明长水机场、西宁曹家堡机场进行检测试验, 经算法评估和产品设计, 与航空器报告对比, 展示了激光测风雷达在复杂环境下的识别性能[5]; 首都机场的多普勒激光雷达执行下滑道扫描模式, 对附近区域进行风场探测, 获得飞机起降区域的三维风场结构[6]; 通过三维建模, 将兰州中川机场真实地形数据融合到风场计算域模型, 利用机载相控阵雷达探测评估中川机场风切变的变化曲线[7][8]。

成都位于四川盆地西部, 机场运行受盆地地形、边界层稳定度季节变化以及对流天气影响明显[9]。近年来天府国际机场投入运行, 形成“双场运行”格局, 在终端区航班密度提升的背景下, 低空风切变与颠簸的识别、预警与精细化预报对提升运行安全裕度具有现实意义。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

样本来自气象部门收到的航空器话音方式空中报告，两机场暂无风切变探测告警设备。采用 WMO 航空危险天气页面对风切变与颠簸强度分级的表述；采用 FAA《Wind Shear》手册，解释低空风切变的典型触发机制与地面告警系统能力边界。

2.2. 分析思路

统计对比：发生次数、年际特征、发生高度与跑道差异；

成因对比：对流外流、阵风锋、热力湍流、尾涡、锋面切变、急流与槽系等；

风险链条：在进近起飞关键阶段，风场不连续导致空速升力突变，进而造成姿态控制困难与跑道偏移风险；

业务建议：监测、预警与预报服务闭环。

3. 低空风切变特征对比

3.1. 天府机场风切变统计结论

天府机场通航以来共收到 21 次风切变航空器空中报告(2022 年 4 次、2023 年 7 次、2024 年 4 次，2025 年 6 次)。在缺少专用探测告警设备的情况下，PIREP 成为识别与复盘风切变过程的核心证据链：飞行员报告高度、位置与强度后，由管制转告气象部门，为预报服务与警报发布提供依据。

从风切变发生位置看，存在明显空间不均匀性：02 号跑道占比约 53% (11 次)，11 号跑道约 24% (5 次)，01 号跑道约 20% (4 次)，19 号跑道约 5% (1 次)。从高度上看，风切变以近地面低高度为主，60% 集中多发生在 300 m 以下。

结合天气背景，对流云相关风切变约 60% (12 次)：与雷暴外流、阵风锋、对流云中垂直气流及其边界造成的风场突变有关；湍流相关风切变约 40% (9 次)：与近地面热力差异导致的湍流运动及局地风场不连续有关。

3.2. 双流机场风切变统计结论

统计 2020~2025 年期间共收到低空风切变报告 18 次。从发生位置看，双流机场低空风切变发生高度更“贴地”：约 96% 发生在 300 m 以内，其中 64% 发生在 100 m 以内；双流机场风切变统计显示 02L 跑道端占比稍多，在不同跑道间的落区差异不明显。

结合天气背景，52% 的风切变由对流云造成，其余由热力湍流、尾涡等原因造成。低空风切变具有明显的年内变化特征，手册指出其主要发生在 7 月，且以对流触发类型为主。

3.3. 两机场统计分析对比

两场风切变特征共性在于，对流触发占主导：两机场统计中对流云相关风切变均为首要类型(天府 60%、双流 52%)。结合 WMO 关于对流下沉气流/微下击暴流导致显著水平风切变的描述，对流外流边界(阵风锋、冷池前沿)可在短时间内造成显著顺逆风分量突变。高度集中在近地面：双流更集中于 100~200 m，天府也以 300 m 以下为主，均与进近末端和起飞初段重叠。对 PIREP 依赖强：两份手册均以航空器空中报告作为统计基础，事件发现具有事后性和抽样性，报告次数的差异也反映出，风切变统计一定程度受飞行员感知影响。

两场在风切变的跑道分布差异,天府在 02 跑道廊道集中度更高(约 53%),双流的跑道落区差异相比更小,表明风切变与两场跑道方位、周边下垫面粗糙度与局地辐合线位置有关。

4. 颠簸特征与天气系统背景

4.1. 天府机场颠簸特征

2022~2025 年共收到 121 份颠簸航空器空中报告。按强度分级:轻到中度 15 份、中度 89 份、中到严重 17 份,以中度为主。按高度分布,3000m 以下高度更为集中。从月份分布看,颠簸报告 7~9 月更集中,其次是 12 月~次年 2 月(见图 1),体现出冷季系统性过程与暖季对流的共同贡献。

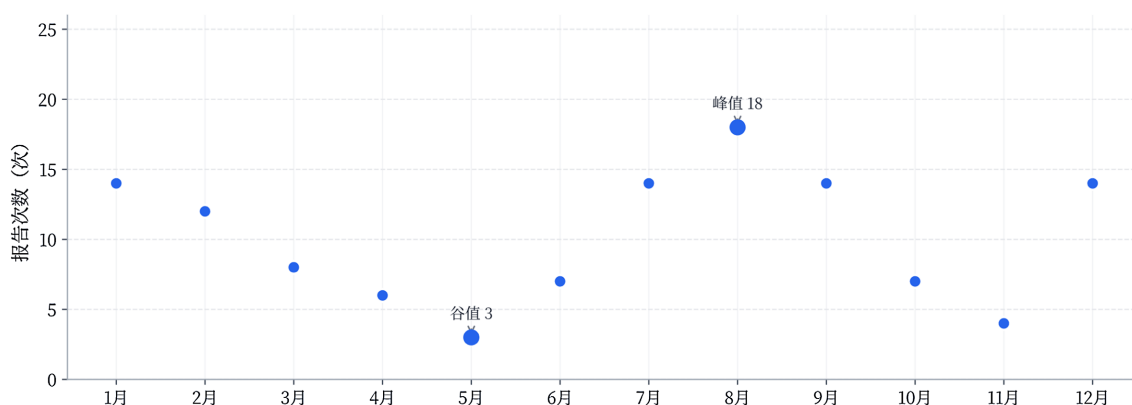


Figure 1. Annual variation in turbulence reports at Tianfu airport

图 1. 天府机场颠簸报告次数年变化

4.2. 双流机场颠簸特征

2020~2025 年 523 份航空器颠簸报告。年际变化呈波动上升趋势;颠簸主要发生在 11 月至次年 3 月(见图 2),占全年 66.51%;在日变化上,报告在夜间至上午时段更易波动增加。强度上以中度为主。在成因方面,主要天气系统包括:急流、锋面、高空槽、高空低涡等。

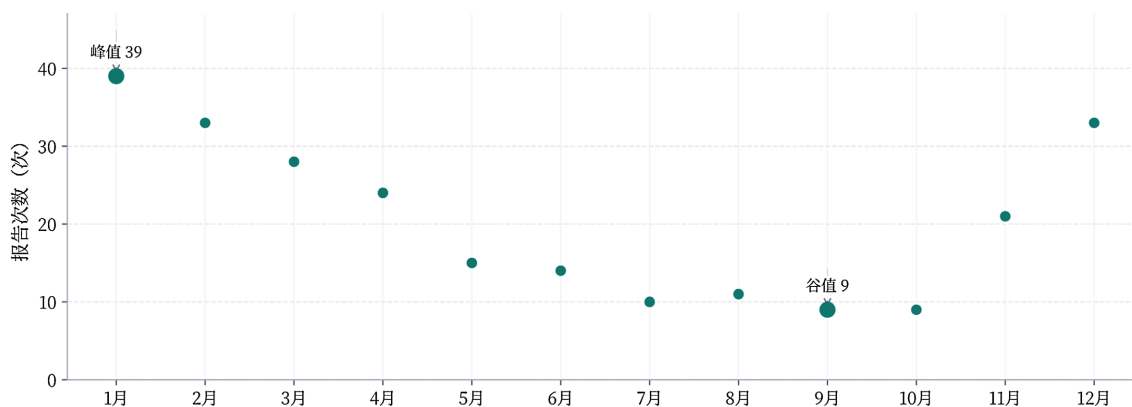


Figure 2. Annual variation in turbulence reports at Shuangliu airport

图 2. 双流机场颠簸报告次数年变化

4.3. 两场出现颠簸高度层与系统类型

根据成都区域飞机颠簸的时空分布特征及成因探讨[10],颠簸过程中高空急流是主要原因,高空槽对

应的颠簸集中在中层，而低空急流与中低层切变线造成的颠簸主要在 2100~4200 m 低层。

当成都两场 500 hPa 风速 ≥ 40 m/s 时颠簸发生概率较大，若叠加高空槽、低涡可进一步加强颠簸。夏季颠簸则多与对流云相关。

5. 典型个例分析

5.1. 天气概况

2025 年 6 月 17 日夜间天府机场出现一次强对流过程，27 架次备降，18:49 (北京时间)本场出现雷暴云团，南风平均风速 5 m/s，阵风达 11 m/s，20:40~00:30 有雷雨过程，期间南北风转变较大，根据航空器空中报告，于 20:00、22:00 收到两次风切变通报，位置分别在 01 跑道端距地 200 m 和 300 m 高度处。

5.2. 环流形势和实况资料

初始场垂直剖面 and 天气形势(图 3, 图 4)显示盆地西北部有小高压向东南方向发展，盆地东南部低压系统向东北方向发展，在盆地中部形成强气压梯度，东南部的对流云团快速北抬，17 日 20~24 时有上升运动，该时段有对流过程，但预报降水强度不高；

探空图(图 5)低层有干区 DCAPE11.4，预报伴随强对流考虑短时大风影响；从本场雷达产品(图 6)上看，此次风切变由跑道南头的对流回波自南向北移动引起，影响 01 落地端，是一次典型对流过程触发的风切变事件。

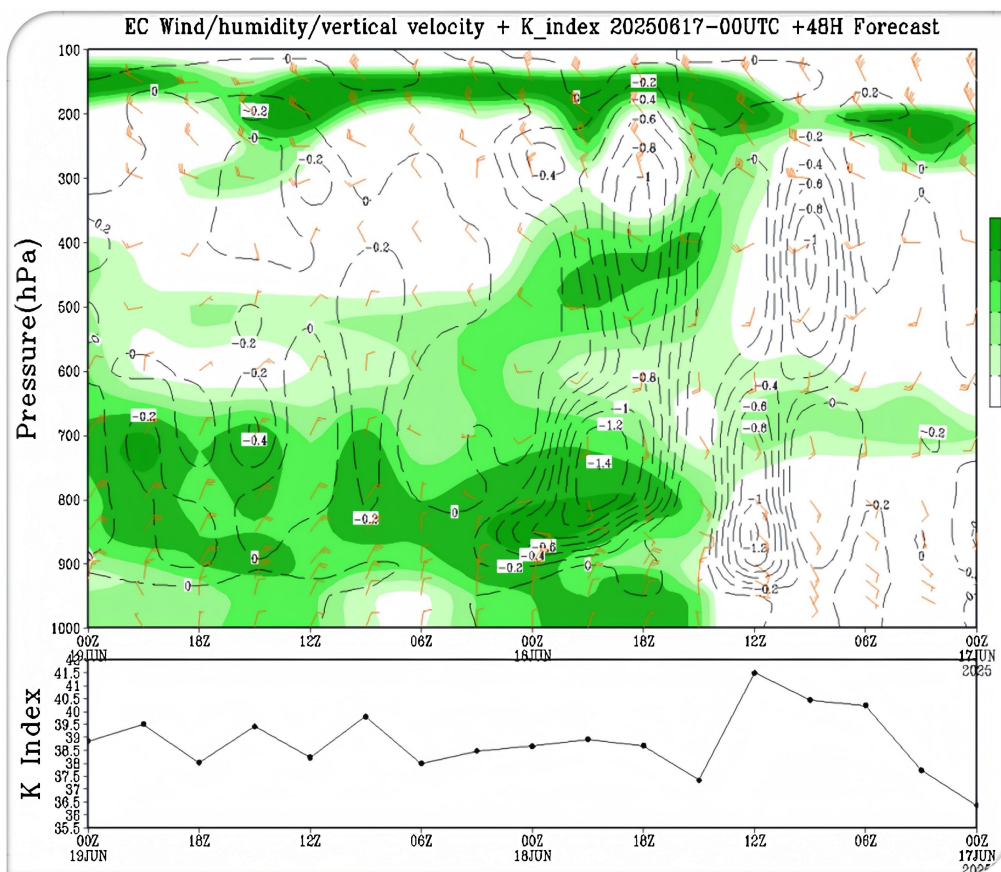


Figure 3. EC Forecast of vertical profile chart
图 3. EC 垂直剖面图

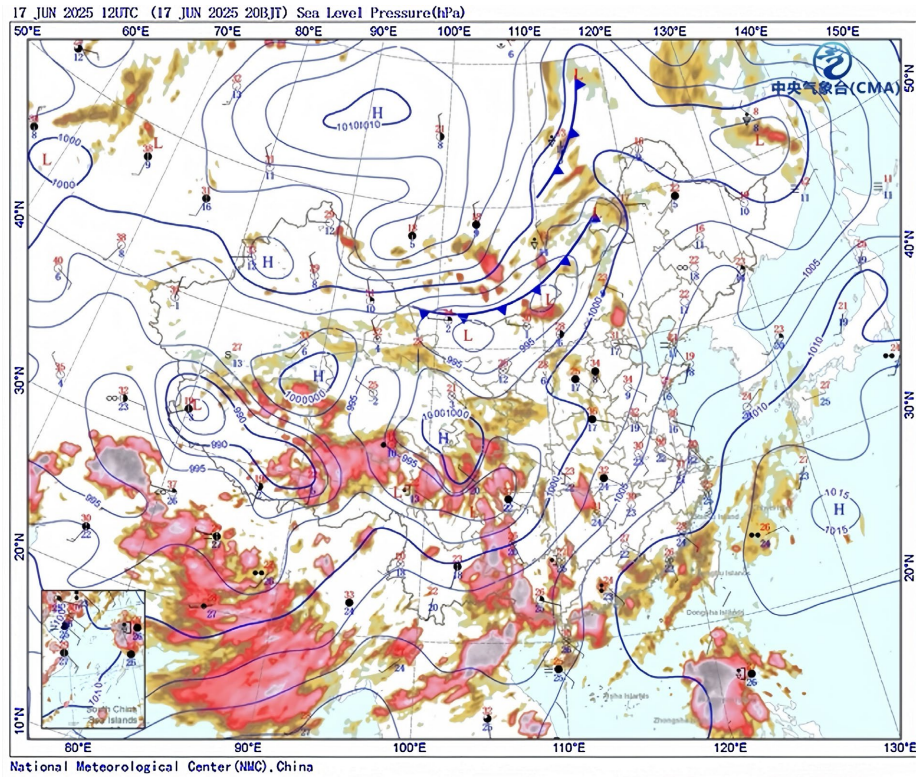


Figure 4. CMA Surface synoptic chart (Source: Central Meteorological Observatory)

图 4. CMA 地面形势(图源中央气象台)

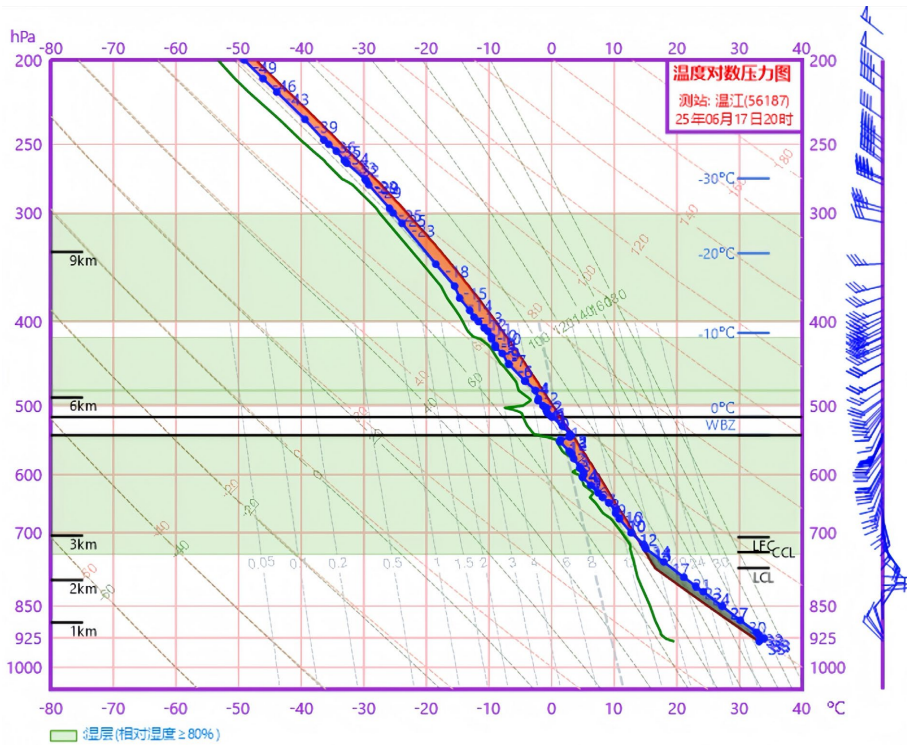


Figure 5. T-lnP Chart of Wenjiang station

图 5. 温江站温度对数压力图

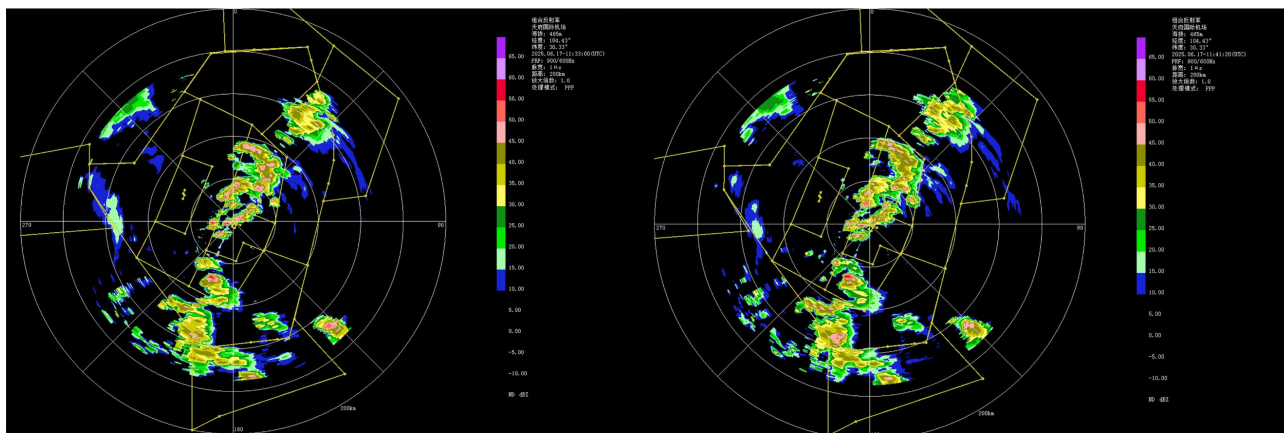


Figure 6. Real-time radar

图 6. 实时雷达产品

6. 风切变 - 颠簸的联动机理与两场运行服务建议

6.1. 联动机理

从风切变到颠簸是同一动力学背景的两种表现,除对流外,切变是造成湍流的第二大来源[11],当层流间的速度差超过一定阈值后会破碎并转化为湍流。成都两场风切变、颠簸风险概括为两类主导情景:

暖季对流情景(5~9月,尤其7月):对流触发的阵风锋、冷池外流导致低空风场迅速转向/增大,形成近地面强切变;同时对流云体内部与边缘的垂直运动导致中到强颠簸。双流 LLWS 高发于7月、天府 LLWS 对流占比60%,均支持该情景。

冷季动力情景(11月至次年3月):高空急流、大风速带边缘、槽前槽后强梯度风区及锋面附近切变增强,易出现晴空、层状云下的颠簸;同时边界层稳定、逆温与低空急流并存时,近地面切变显著,低高度操作风险增加。双流材料显示冬半年颠簸占比达66.51%,急流与槽系为主要系统类型。

地形通道效应:近地层气流会沿浅谷、低地形带更容易顺势加速转向,而跨丘地段风速更易衰减、风向更易偏折;丘陵起伏和粗糙度差异,会显著增大边界层内的湍流动能,机组体感往往表现为颠簸及空速变化。

6.2. 信息链短板

在进近爬升和起飞着陆阶段,航空器处于低高度、低空速裕度与大俯仰推力敏感区。目前两场缺少专用 LLWS 探测告警设备时,风险识别高度依赖 PIREP。然而 PIREP 具有非连续性(取决于航班密度与机组报告意愿)、空间采样有限(偏向某些跑道)、强度描述主观等特点,导致“发现-预警”可能滞后。

6.3. 服务建议

1) 监测:强化跑道廊道风场观测网:在现有自动站、加密站基础上,围绕高风险跑道方向优化布设,形成沿进近离场方向的风场剖面信息。评估部署 LLWS 探测告警系统:通过机场周边多点风传感器网络识别收敛辐散与沿跑道的风损失增益,并向管制与机组发布告警;该系统对微下击暴流等小尺度事件的探测能力依赖传感器密度与布设(相对传统稀疏布点可显著降低漏报)。在天府“无专用设备”的背景下,可开展成本-收益评估,优先面向风切变集中跑道实施。

2) 预报:对流触发型 LLWS:重点识别阵风锋、冷池外流边界的演变速度与走向,结合雷达回波、地面辐合线与加密站风向突变,形成“分钟级”提示。动力型颠簸:沿用手册经验判据(如500 hPa 风速

≥ 40 m/s)并结合急流轴、槽线位置与垂直风切变, 给出终端区分层颠簸风险。

3) 服务: 标准化 PIREP 采集与快速回传: 明确报告要素(高度、位置、强度、持续时间、跑道/航段)并实现可视化展示, 缩短“机组-管制-气象”链路时间。双场联动提示: 两机场位于同一终端区与同一盆地背景下, 对流外流与槽系影响常呈区域性。建议建立双场共享的 LLWS/颠簸风险看板与联合会商机制。

7. 结论

两机场风切变均以对流过程为主导(天府 60%、双流 52%), 同时存在热力湍流等非对流成因; 双流 LLWS 高度更贴地(100~200 m 内占比高), 天府 LLWS 在跑道方向上对 02 廊道集中(约 60%); 颠簸冬半年高发: 成都区域颠簸冬半年高发, 在 11 月至次年 3 月占比达 66.51%, 主要与急流系统有关; 夏季颠簸更多与对流相关; 在现阶段 PIREP 依赖度高的条件下, 应构建 PIREP 快速闭环、雷达连续监测的综合体系, 对风切变地面告警系统开展评估, 优先覆盖高风险跑道端。

参考文献

- [1] World Meteorological Organization (WMO). Aviation-Hazards-Turbulence and Wind Shear. <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/aviation/aviation-hazards-turbulence-and-wind-shear>
- [2] 中国民用航空局. 民用航空气象地面观测规范[EB/OL]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202112/t20211231_210719.html, 2021-12-15.
- [3] FAA (2011) Wind Shear (FAA-P-8740-40). [https://www.faa.gov/files/gslac/library/documents/2011/aug/56407/faq-p-8740-40-windshear\[hi-res\]-branded.pdf](https://www.faa.gov/files/gslac/library/documents/2011/aug/56407/faq-p-8740-40-windshear[hi-res]-branded.pdf)
- [4] 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>
- [5] 范琪, 郑佳峰, 周鼎富, 等. 基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法研究[J]. 红外毫米波学报, 2020, 39(4): 462-472.
- [6] 张旭, 张建军, 丁艳艳, 等. 基于机场多普勒激光雷达的风切变探测与识别[J]. 气象科技, 2021, 49(2): 184-191.
- [7] 章涛, 刘孜雯, 郑智明. 基于复杂地形的低空风切变风场仿真检测[EB/OL]. 现代雷达. <http://xdlj.xml-journal.net/article/doi/10.16592/j.cnki.1004-7859.20241217001>, 2025-05-15.
- [8] 孙伟中. 三部激光雷达对兰州机场风场探测的效能统计分析及低空风切变分级预警的探讨[C]//中国气象学会. 第 35 届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测, 分析与预报. 2018: 1492-1498.
- [9] 袁媛, 何冬梅, 张渝杰. 四川盆地低空飞行的气象条件分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(1): 67-73.
- [10] 张亚男, 罗娅, 陈义义, 等. 西南地区飞机颠簸的时空分布特征及成因探讨[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 853-862.
- [11] 刘岳峰, 张凯, 陈越, 等. 民航飞机低空颠簸与地理环境因子相关性研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 683-691.