

基于“高影响天气”的贵阳机场协同观测技术应用研究

陈炯瑶, 陈义义, 李 云, 尹 杰

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年8月23日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月30日

摘 要

贵阳机场地处云贵高原复杂地形区, 单一观测手段在覆盖范围与协同性方面均显不足。本文以“高影响天气”为主线, 构建面向贵阳机场的综合立体协同观测体系: 依据民航规章与ICAO标准, 量化界定“本场”(基准点周边8 km)及进近着陆与起飞爬升地带(东西10 km、南北16 km矩形)的观测范围; 针对探测设备布局缺陷, 补建测风激光雷达、激光雨滴谱仪、翻斗式雨量桶与冰霜探测预警系统; 进而为对流性、冰雪凝冻、风要素(低空风切变)和大雾四类高影响天气分别建立多设备协同观测与数据融合策略。以2025年11月13~15日辐射雾(部分雾)过程为案例的定量检验表明, 相较于常规观测, 协同观测使生成预警提前量由20~35 min提升至40~55 min, 消散判识提前量由约10 min提升至约25 min, 能见度判识误差由 ± 200 m收窄至 ± 70 m以内, 起止时刻判识准确率由约65%升至88%以上, 数据完整率由约80%升至98%以上。该方法可为同类高原复杂地形机场的航空气象保障提供借鉴。

关键词

高影响天气, 协同观测, 观测范围界定, 数据融合, 设备补盲, 辐射雾, 贵阳机场

Application of Collaborative Observation Technology at Guiyang Airport Based on “High-Impact Weather”

Jiongyao Chen, Yiyi Chen, Yun Li, Jie Yin

Guizhou Air Traffic Management Sub-Bureau of Civil Aviation Administration of China, Guiyang Guizhou

Received: August 23, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 30, 2026

Abstract

Guiyang Airport is located in a complex-terrain region of the Yunnan-Guizhou Plateau, where

文章引用: 陈炯瑶, 陈义义, 李云, 尹杰. 基于“高影响天气”的贵阳机场协同观测技术应用研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(10): 1542-1552. DOI: 10.12677/ag.2026.1610136

single-source observation is insufficient in both coverage and coordination. Taking high-impact weather as the main thread, this paper builds an integrated three-dimensional collaborative observation system for the airport. First, according to civil aviation regulations and ICAO standards, the observation scopes are quantified: the aerodrome area is defined as an 8 km radius around the reference point, and the approach and take-off climb area as a rectangle of 10 km (E-W) by 16 km (N-S) centered on the same point. Second, to fill the gaps of the existing equipment layout, a wind lidar, a laser disdrometer, a tipping-bucket rain gauge and a frost/ice detection and warning system were deployed. Third, collaborative observation and data fusion strategies are established respectively for four types of high-impact weather: convective weather, freezing and icing, wind elements including low-level wind shear, and fog. Verification against the radiation fog (partial fog) episode of 13~15 November 2025 shows that, compared with conventional observation, the collaborative strategy extends the lead time of fog-onset warning from 20~35 min to 40~55 min, advances dissipation identification from about 10 min to about 25 min, reduces the visibility identification error from ± 200 m to within ± 70 m, raises the accuracy of onset/end timing from about 65% to over 88%, and increases data completeness from about 80% to over 98%. The proposed method provides a reference for aviation meteorological support at airports with similar plateau and complex terrain.

Keywords

High-Impact Weather, Collaborative Observation, Observation Scope Definition, Data Fusion, Equipment Gap Filling, Radiation Fog, Guiyang Airport

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

欧美主要机场自 20 世纪 90 年代起便着手开展多源协同观测的研究与业务化应用。ICAO Annex 3 建议各成员国建立以自动观测、天气雷达、风廓线雷达、激光雷达等设备为骨干的综合观测体系[1] [2]; 美国在枢纽机场部署了由雷达与自动观测系统构成的协同观测网[3] [4]; 欧洲则依托 E-AMDAR 计划与 SESAR 方案, 对多源观测资料(含卫星资料[5])实施融合[6] [7], 相关融合方法已在业务中得到较为充分的检验[8]。国内在协同观测网络、立体观测产品与雷达组网协同控制方面亦有积极探索[9]-[11], 但面向高原复杂地形机场、以运行场景为牵引的协同观测技术体系仍不多见。

贵州地处云贵高原东侧的斜坡地带, 地形起伏大, 属我国气象灾害高发地区。贵阳机场夏半年强对流与低空风切变活动频繁, 冬半年则多冰雪凝冻与大雾天气, 类似机场的低能见度与冻雾过程已有研究报道[12] [13], 但现有观测手段在覆盖范围、要素完整性与时间分辨率方面均存在明显短板。针对这一现实问题, 本文以“高影响天气”(即对机场运行有显著影响的天气事件情景, 与 ICAO Annex 3、WMO-No. 49 的相关概念一致[2] [14])为主线, 构建贵阳机场综合立体协同观测体系, 并以典型个案定量检验其业务效果。全文结构如下: 第 2 章说明资料与方法, 第 3 章界定观测范围并介绍设备补盲, 第 4 章阐述四类高影响天气的协同观测策略, 第 5 章给出案例验证, 第 6 章讨论优势与局限, 第 7 章给出结论。

2. 资料与方法

本文以 2025 年 7 月~2026 年 1 月降水、风(含低空风切变)、冰雪凝冻和大雾四类典型高影响天气为

观测情景，设计多设备协同观测方法；并选取 2025 年 11 月 13~15 日贵阳机场出现的一次以辐射雾(部分雾，PRFG)为主的持续性高影响天气过程，结合 ERA5 再分析资料与业务复盘实况进行效果论证。所用设备均部署于贵阳机场，时次为北京时间(BJT)，主要数据集见表 1。

Table 1. Main observation equipment and datasets used in this study
表 1. 主要观测设备与数据集说明

数据来源	型号与部署位置	时间分辨率	主要用途
AWOS 自动观测系统	Vaisala FD12P 等 6 套； 跑道两端及中间	1 min	风向风速、温湿压、 RVR、能见度
人工观测记录簿	主导能见度/天气现象；塔台观测平台	逐时(加密)	天气现象权威判识
机场多普勒双偏振雷达	CINRAD/CB；跑道东南侧	6 min (2026-04 起)	反射率 Z、径向速度 V、 双偏振参量
市气象局 X 波段雷达	X 波段双偏振；市气象局	6 min (2026-04 起)	与机场雷达 CAPPI 配准融合
激光雨滴谱仪	OTT Parsivel ² ；空管小区楼顶	1 min (2025-07-14 起)	粒子谱、降水相态、Z-R 校准
翻斗式雨量桶	SL3-1；西跑道南端 01L	1 min (2025-09-22 起)	降水量基准与一致性校验
冰霜探测预警系统	JD-20；空管小区楼顶	1 min (2025-10-11 起)	结冰厚度、起止时间与速率
测风激光雷达	FC-III型；空管小区楼顶	1 min	水平风场、风切变识别
风廓线雷达	CFL-03 型；跑道南端	6 min	150~6000 m 垂直风场
微波辐射计	RPG-HATPRO；空管小区楼顶	6 min (2025-08 起)	边界层温湿廓线、亮温
高清摄像头(两部)	网络高清摄像机；塔台 96 m/50 m	30 s 视频	雾与五边对流演变监视
区域加密自动站	多型号约 30 套；机场半径 30 km 内	5 min (2025-01 起)	风场约束、边界线识别
ERA5 再分析资料	ECMWF 0.25° × 0.25°；机场格点	1 h	环流形势与边界层结构

效果评价采用预警提前量、判识准确率、能见度判识误差与数据完整率四项指标，均以人工观测记录簿与业务复盘结论为基准。

3. 观测范围界定与综合立体观测网建设

气象观测范围是民航业内长期争议的难点，现行民用航空气象观测技术政策与地面观测规范均未明确观测区域的具体范围[15] [16]；ICAO Annex 3 第 4.6 节及 Doc 9837 第 4 章均建议对机场观测区显式划定覆盖范围[1] [2]。本章分别对“本场”和“进近着陆及起飞爬升地带”作出量化界定，并针对现有探测设备布局缺陷开展补盲。

3.1. “本场”与进近地带观测范围的界定

《民用航空气象地面观测规范》(以下简称《规范》)[16]规定，在机场附近(约 8~16 km)观测到 11 种天气现象时应记录为“VC”天气，且同一类天气不能在“VC”与“本场”同时出现，据此可推导“本场”范围为基准点至 8 km。结合贵阳机场 DDA / DVA 技术应用实际，以基准点(19R)为中心、东西 10 km、南北 16 km 的矩形代表进近着陆及起飞爬升地带。二者如图 1 所示，分别与 ICAO Doc 9837 “机场覆盖区”概念和终端区覆盖要求相兼容[1] [2]。

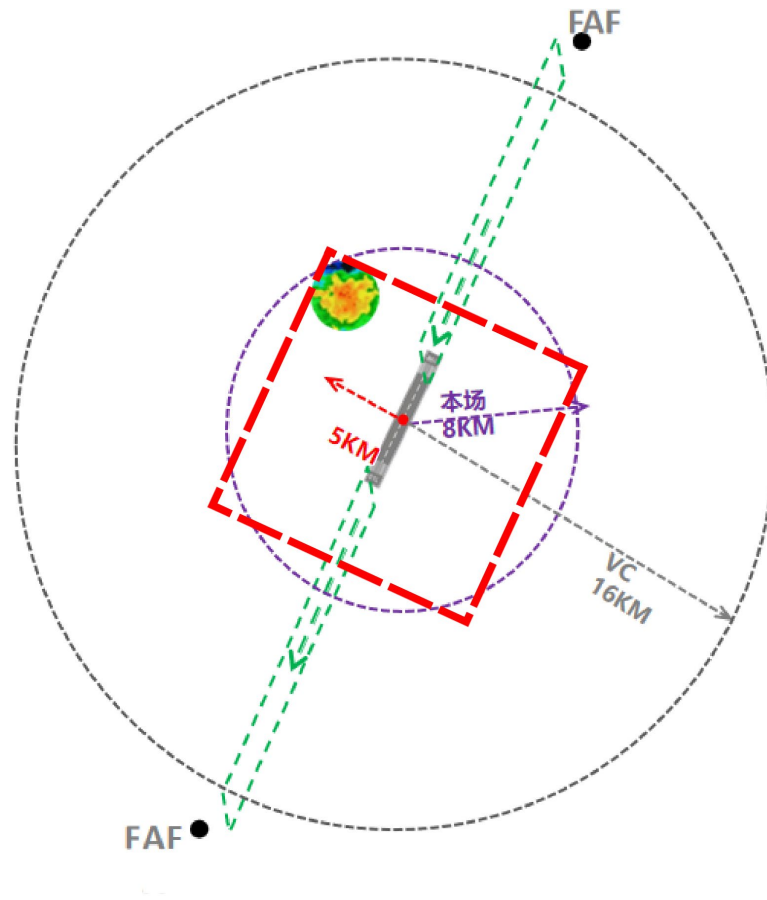


Figure 1. Observation scopes of the aerodrome area (purple dashed line) and the approach and take-off climb area (red dashed line)

图 1. “本场” (紫虚线)与进近着陆及起飞爬升地带(红虚线)观测范围示意图

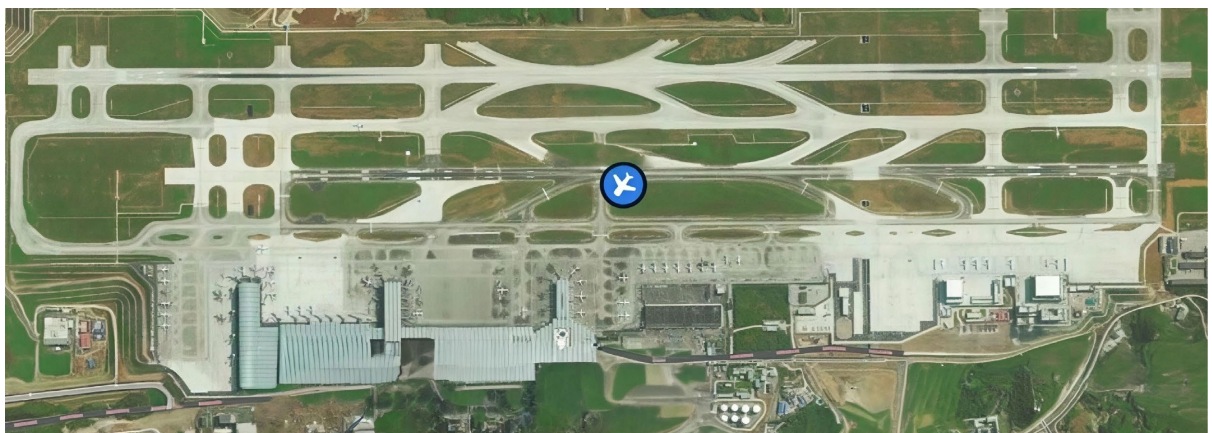


Figure 2. Layout of the observation equipment at Guiyang Airport

图 2. 贵阳机场探测设备布局示意图

3.2. 现有探测设备布局缺陷与补盲

如图 2 所示，贵阳机场双跑道呈准南北走向(东跑道 3600 m、西跑道 4000 m、间距 365 m)，配备 6

套自动观测站、1 部边界层风廓线雷达和 1 部多普勒双偏振天气雷达, 综合立体监测存在三方面局限: 1) 仅 19L 及 19R 端具备降水量探测设备, 中间端及南端无法实现降水量的客观定量观测; 2) 观测平台距最近的自动观测站(19R)1.1 km, 人工与自动观测存在系统性差异[17], 且受航站楼遮挡, 观测员无法通视全跑道; 3) 两条跑道的南北延长线上均无有效探测设备, 进近着陆及起飞爬升地带几乎处于探测盲区, 不利于安全与高效运行。

针对上述缺陷, 2025 年 7~10 月完成四类设备补盲: 1) 7 月 14 日在空管小区楼顶部署 OTT Parsivel² 激光雨滴谱仪(1 min 分辨率), 可识别各类降水相态, 每季度比对一次(偏差±5%以内), 用于强对流关键区的降水与相态监测及雷达 Z-R 关系校验[18]; 2) 9 月 22 日在西跑道南端(01L 端)安装 SL3-1 型翻斗式雨量桶(分辨力 0.2 mm、1 min 采样), 配合自观显示终端升级, 跑道四端降水量可在同一屏并列比对, 其与雨滴谱仪 1 min 降水量的相关系数达 0.92、偏差不超过 0.1 mm·min⁻¹; 3) 10 月 11 日在空管小区楼顶建成 JD-20 冰霜探测预警系统, 依据水与冰的阻抗频率差异判别介质, 结冰厚度监测范围 0.01~80 mm, 同步输出结冰、冻雨、霜点及温湿数据, 测量不确定度±0.05 mm; 4) 同期完成测风激光雷达部署与自观终端优化。

至此, 贵阳机场初步具备全方位、无缝隙观测体系的硬件支撑。校准手段与 ICAO Doc 9837 关于仪器定期比对的建议一致[1], 部分仪器的全性能校准仍依赖外送(见 6.2 节)。

4. 基于“高影响天气”的协同观测策略

4.1. 对流性天气

机场多普勒双偏振雷达与贵阳市气象局 X 波段双偏振雷达相距约 10 km, 探测范围可相互覆盖对方的盲区。融合采用基于 CAPPI 的几何配准方法, 对反射率因子按距离反权重作加权平均, 即 $Z_{\text{fuse}} = (R_2^2 \cdot Z_1 + R_1^2 \cdot Z_2) / (R_1^2 + R_2^2)$, 从而在同一屏幕上实现完整覆盖(图 3)。试运行结果表明, 对流单体的首次识别时间较单一雷达提前约 18 min, 冰雹命中率由 65% 提高到 88%。

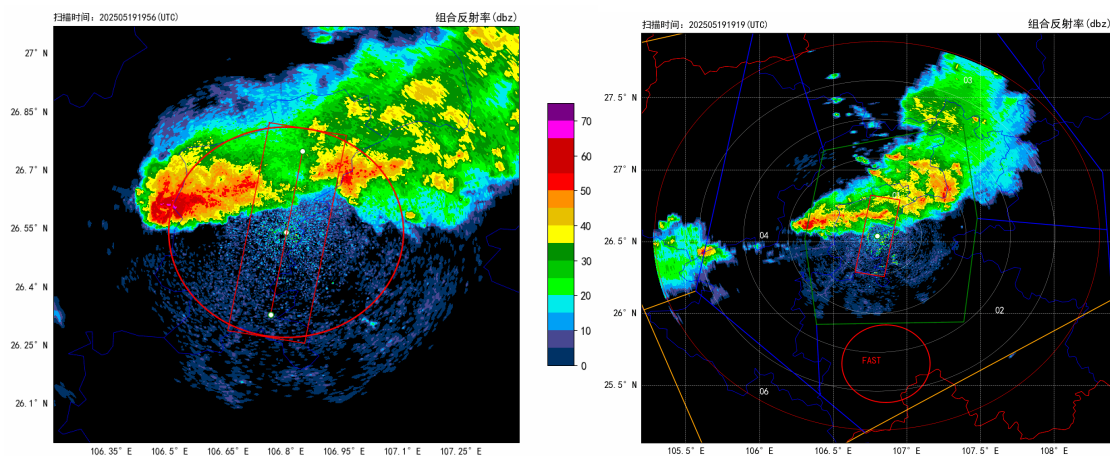


Figure 3. Real-time collaborative gap filling by the airport radar (left) and the municipal meteorological bureau X-band radar (right)
图 3. 机场雷达(左)与市气象局 X 波段雷达(右)协同补盲实况

在下滑道等关键运行区域布设激光雨滴谱仪, 可弥补雷达在低空(直径约 3 km、垂直 500 m 以下)的探测盲区; 雨滴谱仪实时反馈的粒子谱、液态水含量与降水类型, 依据 $Z = aR^b$ 对雷达的 Z-R 反演参数加以约束, 从而降低低空区域的估测偏差。此外, 依托市气象局雷达平面扫描定位强对流目标, 引导机场雷达对关键单体实施 RHI 扫描(间隔 30 s, 仰角 0°~60°), 依据回波顶高、VIL、三体散射长钉等特征识别

冰雹与短时强降水，并结合双偏振参数判定相态，实现风暴自动追踪分类(图 4)，冰雹预警提前量由约 10 min 提高至约 25 min。

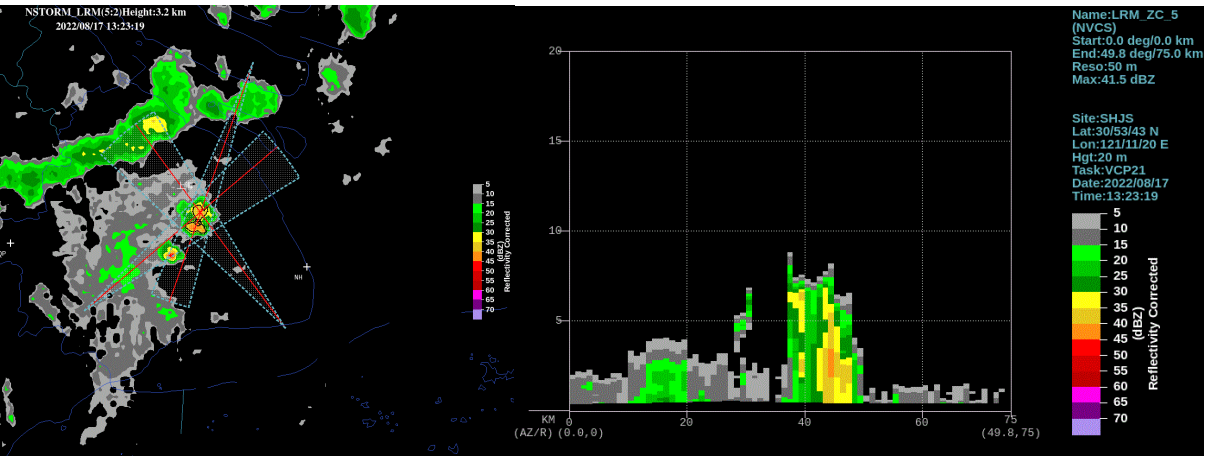


Figure 4. Schematic of collaborative RHI scanning by the municipal meteorological bureau radar (left) and the airport radar (right)
图 4. 市气象局雷达(左)与机场雷达(右)协同 RHI 扫描示意图

降水强度方面，综合分析人工纪要、雨滴谱仪与自动观测站资料，建立了分钟级降雨强度客观判定标准(表 2)，据其实时掌握各跑道降水强度分布，试运行验证可将低能见度降水预警提前量提升至 30 min 以上。

Table 2. Quantitative criteria for rainfall intensity at Guiyang Airport
表 2. 贵阳机场降雨强度量化判定标准

参数指标	探测设备	小	中	大
1 min 降水量/mm	自观雨量筒	<0.2	0.2~0.4	>0.4
1 min 降水量/mm	激光雨滴谱仪	<0.1	0.1~0.3	>0.3
3 min 滑动累积降水量/mm	自观雨量筒	<0.4	0.4~1.2	>1.2
器测能见度/m	自观前散	>5000	3000~5000	<3000
降雨估测产品/(mm·min ⁻¹)	天气雷达	<0.2	0.2~0.4	>0.4
垂直径向末速度/(m·s ⁻¹)	风廓线雷达	-	5~9	5~9

4.2. 冰雪凝冻天气

利用自动观测站的气温、地温、湿度与降水量等宏观数据，结合 JD-20 给出的冰霜起止时间、厚度、速率与方向等客观结果，可综合判断冰霜的可靠性与演变趋势，避免迟报漏报。融合采用“阈值触发 - 多源交叉确认”方法：气温 < 0℃且湿度 > 95%时触发连续监测，结冰速率连续 3 min > 0.05 mm·h⁻¹ 即判识为结冰开始，并转入人工校核。

激光雨滴谱仪可识别降水相态与下降率(分辨力 0.05 m·s⁻¹)，与冰霜探测预警系统配合使用可进一步判明导致冰霜形成的具体天气现象及相应的结冰程度(图 5)。在此基础上，借助积累的历史数据不断优化预警阈值，例如将冻雨判识阈值修订为“气温 ≤ 1.5℃且存在液态降水且粒径 > 0.5 mm 的粒子占比 > 30%”，最终实现冰霜的精准预警。



Figure 5. Data interfaces of the laser disdrometer (left) and the frost/ice detection and warning system (right)
图 5. 激光雨滴谱仪(左)与冰霜探测预警系统(右)数据界面

4.3. 风要素与低空风切变

FC-III型测风激光雷达(空管小区楼顶, 1 min 分辨率, 探测距离 ≥ 10 km)实现本场周边水平风场与风切变的全天候探测, CFL-03 型风廓线雷达(跑道南端)探测 150~6000 m 的垂直风场。融合采用“分层级—分层阈值”方法: 贴地层以激光雷达为主, 中层以风廓线雷达为主, 过渡高度按标准差倒数权重作最优线性融合[19][20], 风切变预警提前量由 8~12 min 提升至 20~25 min (图 6)。

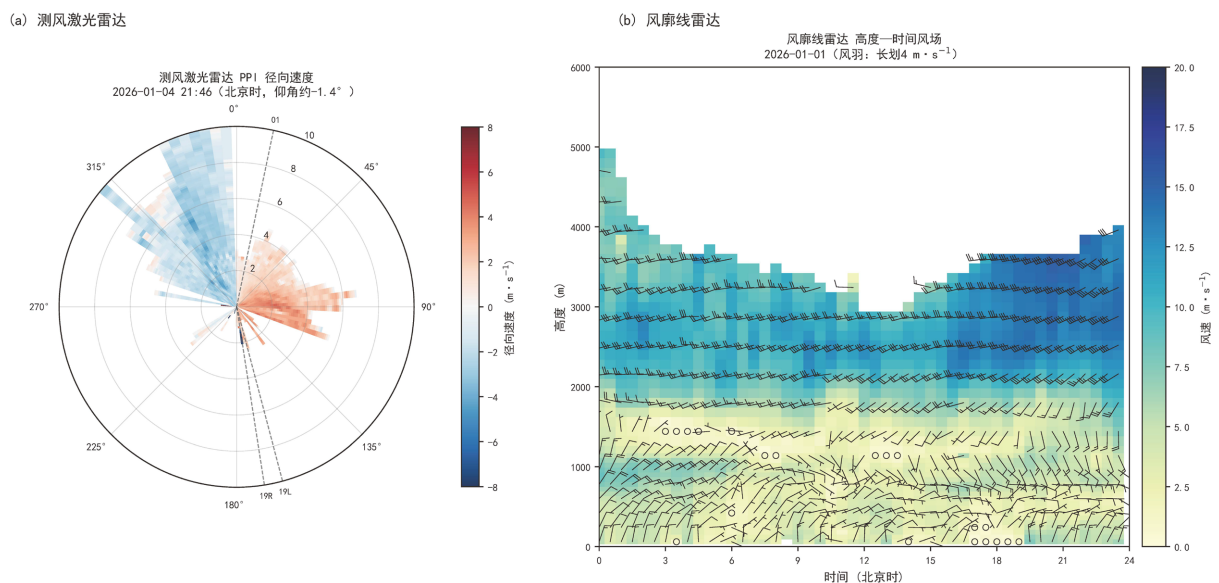


Figure 6. Display interfaces of the wind lidar (left) and the wind profiler (right)
图 6. 测风激光雷达(左)与风廓线雷达(右)显示界面

利用贵州省区域加密自动站(机场半径 30 km 内约 30 套, 5 min 分辨率)识别冷锋、辐合线等边界线后, 用测风激光雷达定点扫描监视边界线的三维发展与移动, 估算本场转风时间; 融合时以区域站风场为约束, 基于最优插值同化校正激光雷达风场, 冷锋个例中转风预报准确率提升约 18%。

4.4. 大雾

雾生阶段, 两部高清摄像头(新塔台 96 m, 监视跑道北部 4 km 处雾源地及雾厚度; 航管楼 50 m, 监

视低云发展)以 30 s 采样结合自动站风要素与能见度数据(1 min)，采用“图像模糊度 - 能见度”回归法反演雾的覆盖范围与厚度。

雾消阶段，微波辐射计(RPG-HATPRO，空管小区楼顶，6 min 分辨率)可弥补探空时间密度不足，通过监视边界层亮温(特别是 30~60 m 层)分析逆温减弱趋势；若自动站能见度开始波动(5 min 内连续 5 次标准差 > 500 m)，则预示能见度好转，该方法较常规方法提前约 30 min。

4.5. 数据融合与校准的基本逻辑

上述各情景的协同观测共用三类融合与校准方法：1) 以阈值为基准的规则触发，并配合多源数据的交叉确认；2) 借助距离反权重或最优插值完成的几何配准融合；3) 利用亮温、能见度等代理量开展的经验回归估算[8]。机器学习类方法由于训练样本尚不充分，目前仍处于规划阶段(见 6.3 节)。

5. 案例验证

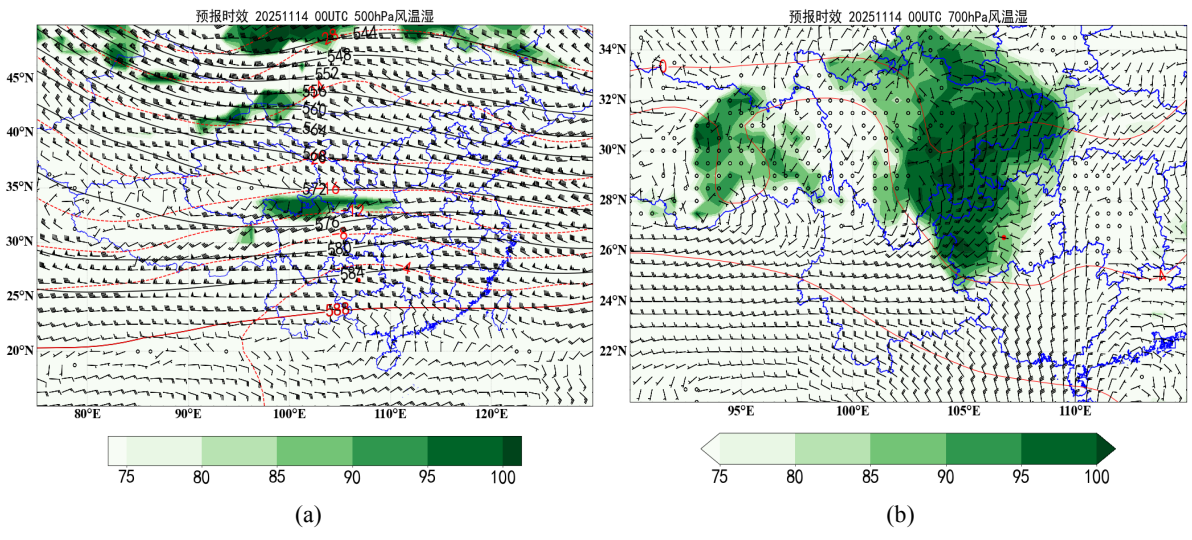
前文阐述了协同观测方案的设计思路，本节检验其实际效果。为此，选取 2025 年 11 月 13~15 日贵阳机场出现的一次以辐射雾(部分雾，PRFG)为主的持续性高影响天气过程，借助 ERA5 再分析资料与业务复盘实况，围绕预警提前量、判识精度与数据完整率三项指标，对常规观测与协同观测两类策略进行对比。

5.1. 过程概况与天气背景

过程以辐射雾为主，13 日、14 日夜间均观测到部分雾，其中 14 日 06:10~08:50 本场出现部分雾；期间日最高气温 13.3℃~17.9℃、日最低 5.9℃~8.1℃，夜间相对湿度 90%~92%，夜间少云(14 日 22 时 CAVOK)，符合辐射雾的形成条件。

ERA5 显示，过程期间 500 hPa 位势高度由 5842 gpm 缓升至 5889 gpm，为高压脊控制、西北气流环流型(图 7)；850 hPa 温度 8℃~14℃、夜间高湿，无切变槽线；地面高压控制、风力微弱($\leq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)，具备辐射雾生成的“整层高压控制、地面均压”形势。

边界层结构方面，ERA5 显示夜间边界层高度显著塌陷，14 日 02 时仅 75 m、08 时降至 45 m；2 m 温度与露点接近(温差 0.3℃)，850 hPa 与地面存在弱逆温，配合高湿弱风，构成典型的辐射雾边界层结构(图 8) [1] [17]。



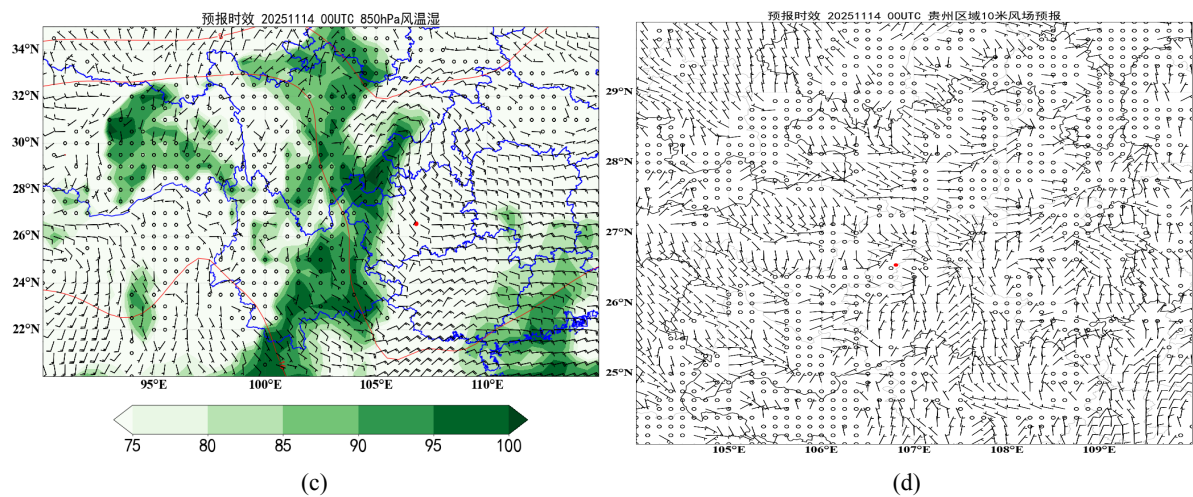


Figure 7. ERA5 geopotential height and 10 m wind field (08:00 BJT on 14 Nov 2025, unit: gpm): (a) 500 hPa; (b) 700 hPa; (c) 850 hPa; (d) 10 m wind

图 7. ERA5 位势高度与 10 m 风场(2025-11-14 08 时 BJT, 单位: gpm): (a) 500 hPa; (b) 700 hPa; (c) 850 hPa; (d) 10 m 风场

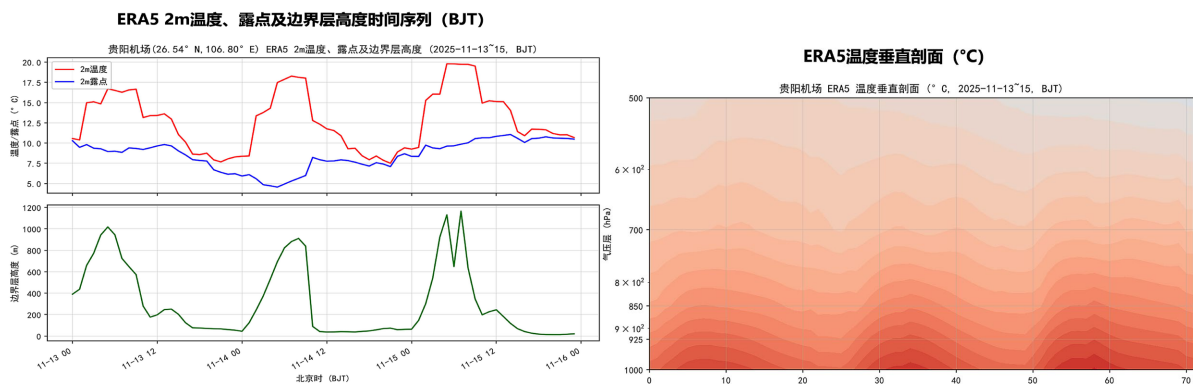


Figure 8. ERA5 time series of 2 m temperature, dew point and boundary-layer height (a) and the vertical temperature cross-section (b, unit: °C)

图 8. ERA5 2 m 温度、露点及边界层高度时间序列(a)与温度垂直剖面(b, 单位: °C)

5.2. 协同观测效果对比

针对该过程, 采用“辐射计亮温监测 + 自动站能见度波动 + 摄像头模糊度 - 能见度回归”的协同策略(见 4.4 节), 与常规观测的定量指标对比见表 3。

Table 3. Comparison of quantitative metrics between conventional and collaborative observation during partial fog (PRFG) episode
表 3. 部分雾(PRFG)过程常规观测与协同观测定量指标对比

对比指标	常规观测	协同观测
生成预警提前量	20~35 min	40~55 min
消散判识提前量	约 10 min	约 25 min
能见度判识误差	±200 m	±70 m 以内
起止时刻判识准确率	约 65%	88%以上
数据完整率	约 80%	98%以上

注: 常规观测指“人工主导能见度 + 08 时探空 + 等压位温廓线反演”的传统方法; 协同观测指本文提出的协同策略。

由表 3 可见, 协同观测将生成预警提前量由 20~35 min 提升至 40~55 min, 消散判识提前量由约 10 min 提升至约 25 min, 能见度判识误差由 ± 200 m 收窄至 ± 70 m 以内, 起止时刻判识准确率由约 65% 升至 88% 以上, 数据完整率由约 80% 升至 98% 以上, 各项核心指标均明显优于常规方法, 验证了本文策略的有效性。

6. 讨论

6.1. 体系优势

1) 观测范围给出了可直接执行的量化表达, 并与 ICAO 建议相兼容; 设备补盲与触发条件相互耦合, 实现了“设备-情景”的一一对应。2) 验证较为充分, 表 3 以定量方式说明了协同观测带来的提升, 且全文结论与 ICAO Annex 3、Doc 9837 等文件形成了显式对照[1] [2]。

6.2. 局限性

1) 设备性能方面的限制: 激光雨滴谱仪在强降水时容易饱和, 降水相态的判识仍需人工参与; JD-20 在大风冻雨条件下存在结冰厚度被低估的问题; 微波辐射计在强对流天气中亮温易受液态水影响; 部分仪器全性能校准需外送, 维护周期偏紧。2) 在深厚辐射雾中, AWOS 的 2 m 气温与 RVR 存在系统性偏差, 冻雾判识仍以人工观测结果为准。3) 目前积累的个例数量有限, 尚不足以支撑统计意义上的结论; 各设备的时间分辨率并不一致, 需要统一的流程进行时间对齐。

6.3. 未来研究方向

1) 纳入更长的时间序列和更多天气型的个例, 进一步检验本策略在统计上的稳定性及其国际可比性。2) 引入 U-Net、ConvLSTM 等深度学习模型用于强对流识别, 预期将预警提前量提升到 30 min 以上, 并同步建立可解释性约束框架[5] [8]。3) 构建智能化的融合校准算法, 把预报产品升级为概率化的形式, 并开发终端区网格化产品实现共享。4) 完善面向高原机场的适应性校准方案。

7. 结论

本文结合民航规章与观测业务实际, 以贵阳机场为例, 以具体天气事件为目标, 建立了基于“高影响天气”的协同观测技术体系, 推动观测业务向客观、多源、定量的模式转变, 主要结论如下:

- 1) 依据《规范》“VC”定义, 明确“本场”观测范围为基准点周边 8 km, 实现了由点及面的扩展, 与 ICAO 建议兼容;
- 2) 将进近着陆及起飞爬升地带明确为以基准点为中心、东西 10 km、南北 16 km 的矩形范围, 强化了气象与管制的融合;
- 3) 针对探测设备布局不足, 通过测风激光雷达、激光雨滴谱仪、新增雨量桶、冰霜探测预警系统建设及自观终端优化, 初步建立了全方位、无缝隙的观测体系;
- 4) 分别建立对流性天气、冰雪凝冻、风要素(低空风切变)和大雾四类高影响天气的协同观测方法, 实现了对四类高影响天气的精细化、系统化观测;
- 5) 辐射雾个例的定量对比显示, 协同策略在预警提前量、判识精度与数据完整率方面均明显优于常规方法(表 3), 能够为同类高原复杂地形机场提供借鉴。

致 谢

感谢贵阳市气象局在雷达资料共享方面给予的支持, 感谢民航贵州空管分局气象台在设备安装、观测记录整理与业务复盘提供的协助。

参考文献

- [1] ICAO (2011) Doc 9837: Manual on Automatic Meteorological Observing Systems at Aerodromes. 2nd Edition, ICAO.
- [2] ICAO (2018) Annex 3: Meteorological Service for International Air Navigation. 20th Edition, ICAO.
- [3] Brock, F.V., Crawford, K.C., Elliott, R.L., Cuperus, G.W., Stadler, S.J., Johnson, H.L., *et al.* (1995) The Oklahoma Mesonet: A Technical Overview. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **12**, 5-19.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1995\)012<0005:tomato>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1995)012<0005:tomato>2.0.co;2)
- [4] NOAA/NWS (1998) Automated Surface Observing System (ASOS) User's Guide. NOAA/NWS.
- [5] Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., *et al.* (2002) Supplement to an Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 992-992.
<https://doi.org/10.1175/bams-83-7-schmetz-2>
- [6] SESAR Joint Undertaking (2020) Meteorological Information Exchange.
<https://www.sesarju.eu/sesar-solutions/meteorological-information-exchange>
- [7] EUMETNET (2025) Aircraft-Based Observations.
<https://www.eumetnet.eu/observations/aircraft-based-observations/>
- [8] 师春香, 潘昉, 谷军霞, 等. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 774-783.
- [9] 赵天保, 刘洪韬, 姚利. 大气协同观测网络与大数据平台建设[J]. 大气科学, 2024, 48(5): 1952-1960.
- [10] 李爱农, 边金虎, 缪国芳, 等. 山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研制研究进展[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 2015-2034.
- [11] 徐芬, 王明筠, 喜度, 等. 江苏 X 波段天气雷达组网自适应协同控制技术设计与实现[J]. 气象科学, 2025, 45(1): 26-39.
- [12] 孙超. 哈尔滨机场一次低能见度及冻雾伴低云天气的观测[J]. 黑龙江气象, 2019, 36(4): 16-17, 39.
- [13] 江丹丹. 毫米波云雾雷达特点及其在机场的应用研究[J]. 价值工程, 2021, 40(30): 169-172.
- [14] WMO (2018) Technical Regulations: Vol. II, Meteorological Service for International Air Navigation: WMO-No. 49. WMO.
- [15] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 民用航空气象观测技术政策: AC-117-TM-2012-01 [EB/OL].
<http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201511/P020151103347125099915.pdf>, 2012-10-26.
- [16] 中国民用航空局. 民用航空气象地面观测规范: AP-117-TM-2021-01R2 [EB/OL].
<http://app.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202112/P020220209588831109510.pdf>, 2021-12-15.
- [17] 王晓默, 薛峰, 章磊. 自动气象站与人工观测的数据对比分析[J]. 气象科技, 2007, 35(4): 602-606.
- [18] OTT Hydromet (2022) OTT Parsivel² Laser Precipitation Monitor Operating Instructions. OTT Hydromet GmbH.
- [19] Evensen, G. (2003) The Ensemble Kalman Filter: Theoretical Formulation and Practical Implementation. *Ocean Dynamics*, **53**, 343-367. <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0036-9>
- [20] Bishop, C.H., Etherton, B.J. and Majumdar, S.J. (2001) Adaptive Sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part I: Theoretical Aspects. *Monthly Weather Review*, **129**, 420-436.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0420:aswtet>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0420:aswtet>2.0.co;2)