

1 基于激光测风雷达的广汉机场一次锋面大 2 风分析

3 张琬涓^{1,2} 吴俊杰² 张博义³

4 1. 中国民用航空西南地区空中交通管理局云南分局, 昆明 650200

5 2. 中国民用航空飞行学院 航空气象学院, 四川广汉 618300

6 3. 北京莱维塞尔科技有限公司, 北京 101318

7 **提 要:** 低空飞行活动极易受到复杂风场影响, 故低空风精细化监测预警技术被民航气象部门高度关注。利
8 用激光测风雷达、机场自动观测设备及再分析资料对四川广汉机场 2021 年 12 月 26 日一次锋面大风过程进
9 行分析。结果表明, 激光测风雷达能够清晰反映出冷空气影响本场时, 地面大风在低空急流减弱后约 4~6 h
10 出现, 动量下传与垂直运动变化具有明显的不均匀性。下沉运动有利于低空急流动量下传导致地面风速增
11 大, 上升运动阻碍动量下传导致地面大风间歇。激光测风雷达 12° PPI 扫描可以提前 1.0~1.5 h 对本场下
12 滑道及地面可能出现的大风进行预警。锋后残余冷空气的入侵造成了本场二次起风, 预报大风时需加以关
13 注。表明激光测风雷达能显著提升低空风场演变过程的监测精细度, 研究结果为保障低空飞行安全和效率
14 提供了有益参考。

15 **关键词:** 激光测风雷达, 锋面大风, 动量下传

16 DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.071701 中图分类号: P458

17 18 Analysis of a Cold front Strong Wind at Guanghan Airport Based on 19 Doppler Wind Lidar

20 Zhang Wanjuan^{1,2} Wu Junjie² Zhang Boyi³

21 1 Yunnan Sub-bureau, Southwest Air Traffic Management Bureau CAAC, Kunming 650200

22 2 College of Aeronautical Meteorology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300

23 3 Beijing Levicell Technology Co., Ltd., Beijing 101318

24 **Abstract:** Low-altitude flight activities are highly susceptible to complex wind fields, leading
25 civil aviation meteorological departments to place significant emphasis on refined monitoring and
26 early warning technologies for low-altitude winds. This study analyzes a cold front strong wind at
27 Guanghan Airport on December 26, 2021, using Doppler wind lidar, airport automatic observation
28 equipment, and reanalysis data. The results indicate that the Doppler wind lidar can clearly show
29 that during the influence of cold air, surface strong winds occur approximately 4-6 hours after the
30 low-level jet weakens, with significant non-uniformity in downward momentum transfer and

中国气象局航空气象重点开放实验室项目资助 (HKQXM-2024014)

作者简介: 张琬涓 (2000-), 女, 理学学士, 助理工程师, 研究方向为航空气象观测与预报, 邮箱
1017186847@qq.com

vertical motion changes. Subsidence enhances the downward momentum transfer of the Low-level jet, resulting in increased surface wind speeds, while upward motion hinders downward momentum transfer, leading to intermittent surface strong winds. The 12 °PPI scanning of the Doppler wind lidar can provide early warnings of potential strong winds along the glide path and at the surface 1-1.5 hours in advance. The intrusion of residual cold air behind the front caused a secondary wind event, which should be taken into account when forecasting strong winds. This study demonstrates that Doppler wind lidar significantly enhances the monitoring precision of low-altitude wind field evolution, providing valuable insights for ensuring the safety and efficiency of low-altitude flight operations.

Key words: Doppler wind lidar; cold front strong wind; downward momentum transport

引言

风是影响飞行安全最直接、最重要的气象因素，尤其是在飞机进场阶段。此时飞机已调整至降落构型，处于慢速不稳定状态，姿态易受大风干扰。由于飞行高度低，飞机状态发生突发性变化后留给机组处置时间短，一旦处置不当，极易造成严重后果（黄仪方, 2011；何志强等, 2014；郭智亮等, 2019）。因此，监测预警低空风场异常一直是航空气象关注的焦点问题。随着国内“低空经济”的逐渐升温，低空空域飞行活动日益频繁（张彧, 2025），其主流的低慢小航空器对风场异常更加敏感。因此，提升风场监测预警技术，对保障低空飞行安全有重要意义。

地面大风形成与各种尺度天气系统密切相关，可分为锋面大风（王艳兰等, 2021）、动量下传大风（杨亦萍等, 2022；梁希豪等, 2023）、雷暴大风（刘彬等, 2022；吴海英等, 2023；曹倩等, 2024）、台风大风等（杨绚等, 2020；刘婧茹等, 2023），同时峡谷及沙漠等特殊的地形及下垫面也是地面大风形成的重要原因之一（汤浩等, 2020）。目前对于锋面大风的研究多关注与锋面伴随的雷暴大风，如深厚东北冷涡配合锋生在冷锋尾部激发形成飚线系统产生雷暴大风（王婷婷等, 2023）、冷锋的强迫抬升作用及干冷空气侵入暖湿气团触发形成极端雷暴大风（康岚等, 2018）及锋后冷空气产生的动量下传、锋面附近的强变压风、梯度风与中尺度对流系统产生的混合大风（朱男男等, 2023）。由于地形原因，四川盆地产生地面大风的频次较低，而一旦出现往往会造成比较严重的影响（龙柯吉等, 2020）。以往气象部门更加关注大范围锋面大风过程，多选取极端灾害性大风天气进行研究（吴芳芳等, 2019；高帆等, 2023；黎玥君等, 2024），但民航气象部门对大风的定义和监测预警的时空

分辨率有相对特殊需求。国内外针对低空风监测也发展了多种技术手段（赵文凯等，2020；杨欣和王加平，2023；任菊章等，2025），其中激光测风雷达具有探测精度高、时空分辨率高、能覆盖进离场低空区域、对风切变进行预警等优势，成为机场低空风场监测的有力装备（蒋立辉等，2016；傅军等，2021），已在国内多个复杂地形机场得到了应用与验证（黄轩等，2022；王楠等，2023；陈阳权等，2024）。四川作为国内“低空经济”先行试点地区，低空飞行活动高居全国前列，但激光测风雷达在四川盆地非典型大风区的应用研究较少。本文利用激光测风雷达的多种扫描模式、机场自动观测数据及再分析资料对广汉机场 2021 年 12 月 26 日一次锋面大风进行探讨与精细分析，旨在加强对成都平原锋面大风的结构及变化特点的认识，为低空飞行提供更好的航空气象服务保障。

1 资料介绍

广汉机场地处成都平原东北部，海拔高度 468 m，拥有一条近西北—东南向跑道(图 1)，机场单向运行，即仅由西北向东南方向起飞/降落。作为国内最大的仅用于训练飞行机场之一，飞机起降频率高，且机型多为中小型飞机。为了确保飞行训练安全，不同等级飞行训练均有严格的风速标准（表 1）。2021 年 12 月 26 日 04:30—10:30（北京时，下同）广汉机场经历了一场短时大风及二次起风过程，地面两分钟平均风速超 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上，严重扰乱了当日的飞行训练安排，以下基于激光测风雷达并结合其它气象资料对此次大风过程进行分析研究。



图 1 广汉机场及气象设备位置示意图

Fig.1 The location of Guanghan Airport and meteorological equipment

表 1 飞行训练正侧风安全风速标准

Table 1 Standards for Safe Wind Speed in Flight Training with Crosswinds

起降时正侧风风速（垂直 跑道方向风分量）	学生单飞训练	学生机长训练	教员带飞训练	高教机训练
	$\leq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\leq 7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\leq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

2021 年 7 月起，广汉机场于机场跑道旁的塔台附近布设了一部激光测风雷达，除西南方向部分受塔台遮挡外，该雷达能够较好监测飞机起降方向（吴俊杰等，2023b）。雷达交替采用平面位置扫描模式（Plan Position Indicator, PPI）和多普勒激光束摆动扫描模式（Doppler Beam Swinging technique, DBS）扫描（Dong et al, 2021）。其中 PPI 模式采用 4° 和 12° 仰角进行平面扫描，用于监测机场下滑道周围及低空空域的水平风场情况，DBS 模式可以获取本场上空的三维风廓线和垂直速度，约 10 min 可以完成一次所有模式扫描。

本研究还使用了广汉机场自动观测系统记录的分钟级风向风速、气压、温度和湿度要素。ERA5 资料用来分析大风过程的天气背景，资料空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为 1 h，包括位势高度、温度、海平面气压。

2 大风实况及天气背景分析

12 月 25 日 06:00—7:30，广汉机场地面风由偏东风迅速转为偏北风，风速显著增加，此后直至 26 日 19:00 前后，风向一直以东北风为主（图 2）。25 日 7:30—18:00，气温日变化不明显，稳定在 8°C 上下，气压则表现出单峰型日变化特征，风速波动上升，最高可达 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。25 日 18:00 以后，气温持续下降，至 26 日 08:00 左右降至第一次谷值，约为 4°C ，经历短暂升温后气温再度降低，于 14:00 左右达到第二次谷值，约为 3°C 。在此过程中，气压则持续上升，两次温度谷值分别对应两次气压峰值，第二次气压峰值达到了过程最高值，随后气压开始迅速降低。随着气温和气压的迅速变化，风速波动上升且波动振幅和频率均显著增加，04:30 左右本场出现 $7.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的地面大风，随后风速继续增大并于弱温度峰值的 06:00 左右达到过程最高值（ $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。随后迅速减小，出现了风间歇，对应气温的回升。随后风速又迅速波动上升，并于气温峰值的 10:00 达到此次过程的第二次风速峰值（ $7.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），二次起风期间气温再次下降、气压上升率明显增大。10:30 后风速逐渐波动下降，地面大风结束。需要注意的是，初次大风的风速和振幅均大于二次起风，对飞行的威胁也更大。本次大风过程虽然持续时间较短，但存在明显风间歇和短时二次起风的复杂情况，加之其出现在本场飞行训练高峰期，风速高频振荡对训练中的飞机会构成较大的安

全威胁，而机场常规的自动观测设备无法对此类变化较快的大风垂直结构和演变进行监测，因此预报此类大风的起风和风间歇一直是业务工作面临的难点问题。

从天气背景来看，12月25—26日500 hPa中高纬呈“两槽一脊”形势，出现“Ω”型经向环流，26日位于我国内蒙古的横槽转竖，等高线与等温线交角明显，冷平流强烈，前期堆积成熟的冷空气迅速东移南下。广汉机场位于南支槽槽前，西南气流带来的充足水汽与南下冷空气交汇有利于大范围的锋面云系的形成（图略）。850 hPa形势来看（图3a~3c），12月25日冷高压中心由贝加尔湖西南部向东南移动进入我国陕甘宁地区，高压前沿伴随的等温线密集带南移进入四川盆地。25日20:00本场位于冷高压前沿，高空锋区与0℃等温线南压至本场北面，冷锋开始影响本场，本场850 hPa受 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北风控制。26日00:00，0℃等温线南压至本场，本场上空东北风加强至 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，本场受锋后东北低空急流影响。26日06:00东北低空急流进一步向本场东面移动。在此过程中，海平面气压场总体呈“东北高、西南低”的形势（图3d~3f），川渝地区等压线有两个向南的凸起，说明冷空气主体沿四川盆地东部南下，另一股冷空气则沿青藏高原东部翻越秦岭南下进入四川盆地，气压梯度明显增加。26日00:00后本场10 m风增大至 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，但与机场实况相比ERA5资料的地面风速偏小。

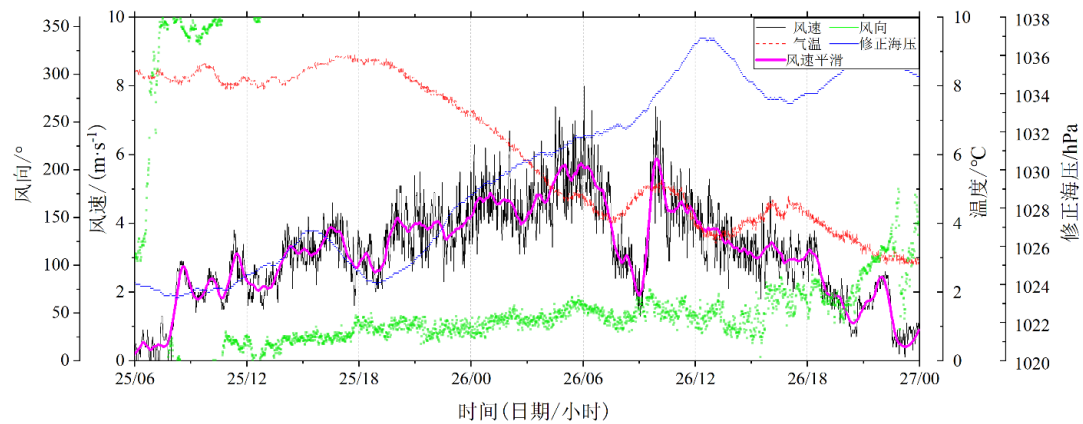
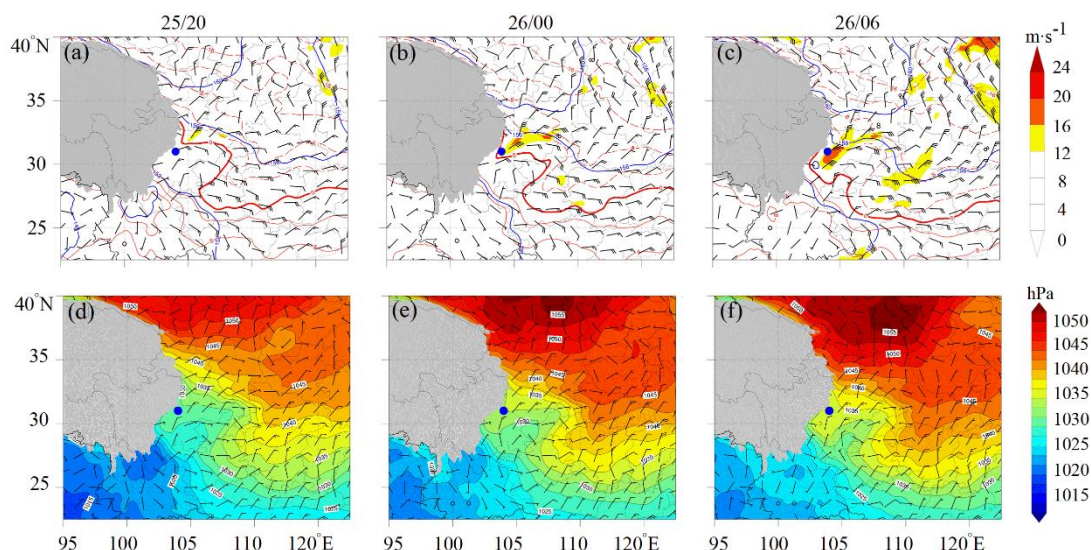


图2 2021年12月25日06:00至26日24:00广汉机场气象要素变化

Fig.2 Weather element changes at Guanghan Airport from December 25, 2021, 06:00 to December 26, 24:00



注：图上方数字表示日/时，蓝点表示广汉机场位置，灰色阴影表示青藏高原；蓝色实线表示等高线，单位： dagpm ；红线表示等温线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ，粗红线表示 0°C 等温线；风向杆一长划表示 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，一短划表示 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图 3 2021 年 12 月 25—26 日 (a~c) 850 hPa 低空急流 (填色) 及 (d-f) 海平面气压场 (填色)

Fig.3 850 hPa(a-c, shading indicates 850 hPa low-level jet) and sea level pressure field(d-f, shading indicates the mean sea level pressure) situation map, December 25-26, 2021

3 风场结构及热动力特征分析

由此次大风过程的剖面图可以看到，过程中本场 700 hPa 以上为西南风，主要受 500 hPa 南支槽影响，而 700 hPa 以下则主要由东北风控制，反映出冷空气从 700 hPa 以下的低空入侵（图 4a）。本场起风前的 24 日 12:00 至 25 日 06:00，本场上空 800 hPa 以下为弱偏南风，与弱暖平流对应。25 日 06:00 后，本场低空出现弱冷平流（图 4b），有利于低空冷垫的形成。由于本场位于冷高压底部，向西南移动的冷高压很快影响本场，12:00 本场上空 850 hPa 以下转为一致的弱东北风，此后东北风不断增强且厚度增大，最高可达 700 hPa 附近。值得注意的是，13:00 后本场上空 900 hPa 风速首先增大至 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，18:00 进一步增大至 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，至 26 日 00:00，风速达到过程最高的 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，并持续至 26 日 06:00，风速大值中心进一步抬升至 850 hPa，低空急流及其上、下方的风向和风速切变都会对飞行安全构成严重威胁，26 日 18:00 后风速开始逐渐减弱。结合温度平流来看（图 4b），25 日 12:00 左右地面附近的冷平流显著增强，18:00 起冷平流中心明显抬升至 900 hPa。与之对应，25 日 18:00 至 26 日 00:00 本场上空假相当位温等值线明显加密且几乎与地面垂直，结合前文天气形势及风场情况可以判断锋面于 25 日 20:00 时到达本场附近。26 日 00:00—09:00 时本场低空

受暖平流控制且厚度迅速增加至 800 hPa，假相当位温等值线密集程度减小，而原有冷平流进一步抬升至 850 hPa 附近，凌驾于低空暖平流之上，构成“上冷下暖”的不稳定形势，有利于上层的补充冷空气与近地面不断发生热、动量交换，加之本场上空的 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区维持到 26 日 12:00 时才逐渐减弱消失，因此本场地面风速在锋面过境后得以继续增大直至出现大风。再分析数据能够捕捉到本次大风过程基本情况，但无法反映风间歇和二次起风情况，也无法具体体现高空大风演变与低空风场的联系，下面利用激光测风雷达资料做进一步的精细化分析。

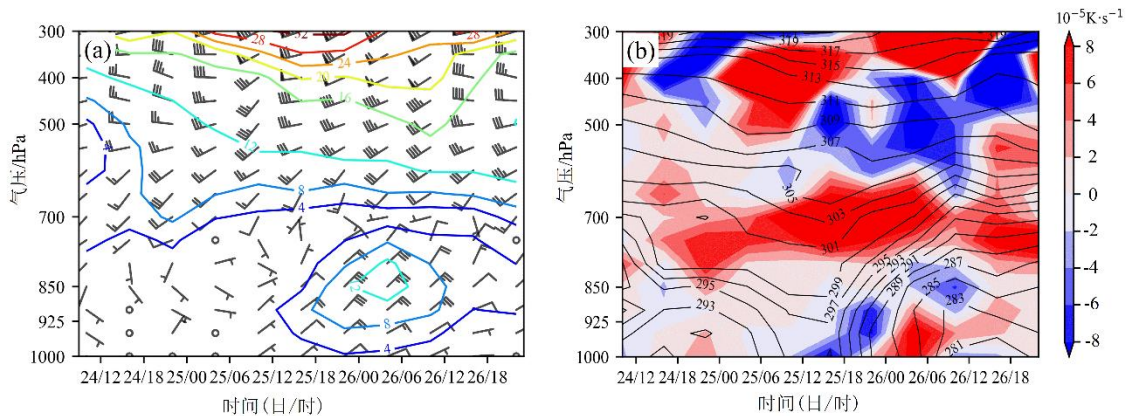


图 4 2021 年 12 月 24 日 12:00 至 26 日 24:00 广汉机场(a)风场时间-高度剖面(等值线为全风速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、(b)假相当位温与温度平流时间-高度剖面(等值线为假相当位温 θ_{se} , 阴影为温度平流, 正值表示暖平流, 负值表示冷平流)

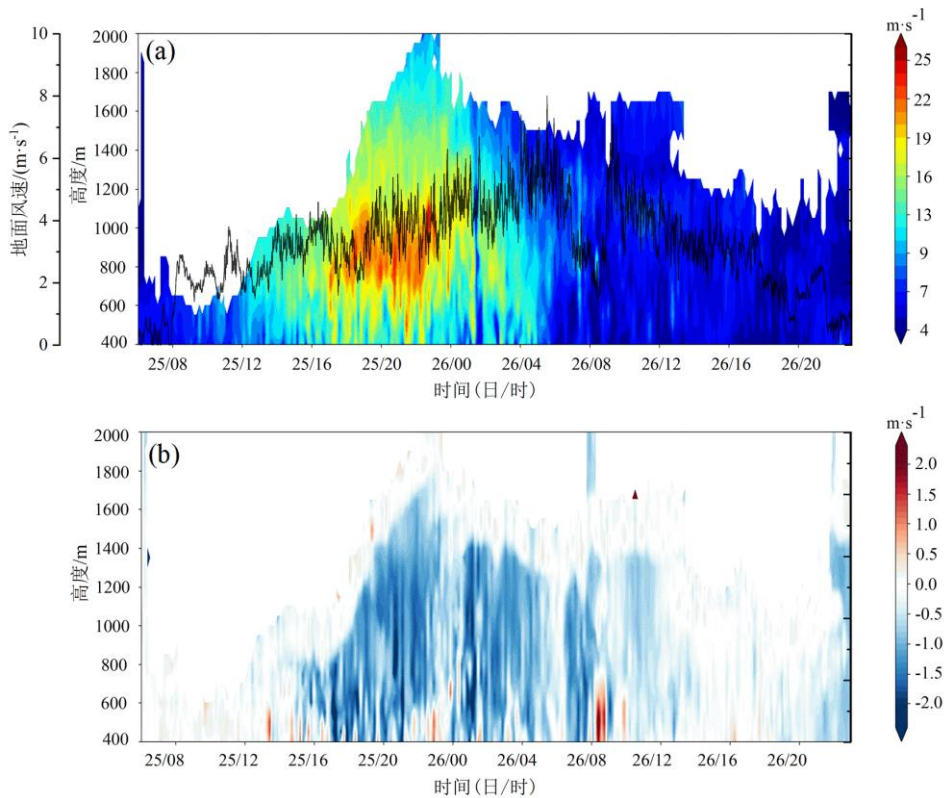
Fig.4 Time-height profiles of the wind field at Guanghan Airport from December 24, 2021 12:00 to December 26, 2021 24:00 (a, contour lines represent the total wind speed, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and time-height profiles of pseudo-equivalent potential temperature and temperature advection (b, contour lines represent pseudo-equivalent potential temperature θ_{se} , shading indicates temperature advection, with positive values indicating warm advection and negative values indicating cold advection)

4 基于激光测风雷达的风场精细化分析

4.1 激光测风雷达垂直风场探测

由激光测风雷达 DBS 模式探测到的全风速剖面可以看到(图 5a), 2021 年 12 月 25 日 10:00 前本场上空 400~2000 m 风速没有明显变化趋势, 25 日 10:00 后本场上空风速开始增大, 12:00 风速达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 并继续增大, 同时地面风速波动上升, 25 日 18:00 至 26 日 00:00 距地面 800 m 高度附近出现了一个最大风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均风速在 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的大风速核, 与天气形势中本场上空的低空急流特征基本一致, 风速变化趋势相似, 但与 ERA5 资料相比最大风速更大、出现时间更早, 说明 ERA5 资料存在低估风速的情况。进一步对比可以看到, 低空大风速核存在波动下传, 其与地面风速的瞬时峰值相对应。26 日 00:00

后大风速核开始逐渐减弱，而地面风速继续波动上升，结合前文可知地面大风的出现时间滞后于低空急流减弱时间约 4~6 h。未来将继续对多个相似个例进行深入统计分析，总结本场受冷锋影响下地面大风滞后时间的特征以供业务参考。结合垂直速度剖面（图 5b）可以看到，25 日 18:00 大风速核出现同时本场上空伴有强下沉气流，且下沉气流区的厚度逐渐增厚，地面风速的增大与下沉气流的强度有一定关联，此过程本场先出现东北低空急流，冷空气从低空入侵，锋面过境后的强下沉运动有利于加强动量下传，导致本场风速持续增大。而在风间歇期，本场上空 400~800 m 高度出现了强上升气流，结合前文可知此时本场上空出现了暖平流。随后本场二次起风时，本场上空强上升气流再度转为下沉气流，结合前文可知此时本场 850 hPa 再次出现冷平流，不稳定的气层结构与垂直运动加剧了上下层的动量交换，说明此过程本场上空冷暖平流和垂直运动变化情况与大风的生消和二次起风密切相关，也可以看出此过程大风速区下传与垂直运动变化情况均具有明显的阵性，冷平流与下沉气流有利于大风速区下传使得本场地面风速增大，反之则有利于风速减小。另外通过图中缺省值变化情况，结合激光测风雷达在云中严重衰减的特性（吴俊杰等，2023a），可以推断本次冷锋过境前和过境时广汉机场上空出现较厚云层，雷达的探测高度受到较大影响，冷锋过境后云底高度逐渐抬高，雷达缺测数据也逐渐减少。



注：a 图中等值线为自动观测系统测得的风速，图中白色区域表示激光雷达信噪比过小，按照缺省处理。

图 5 2021 年 12 月 25 日 06:00 至 26 日 24:00 (a) 全风速和 (b) 垂直速度 (正/负值表示上升/下沉运动) 时间-高度剖面

Fig.5 On December 25, 2021, from 06:00 to December 26, 24:00, total wind speed (a) and the vertical speed (b, with positive/negative values indicating upward/downward motion) time-height profile are shown

由湍流交换系数公式 $K = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|$ (吕美仲等, 2004) 可知, 湍流交换系数大小与混合长 l 和垂直风切变 $\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|$ 相关, 即风切变越强则湍流活动越强。根据大风速核的高度, 选取 800 m 与 400 m 高度的风速计算风速变化率并与地面风速对比 (图 6), 可以看出 25 日 16:00 至 26 日 04:00 受锋面影响, 本场上空风速变化率明显增大, 湍流活动的增强使得边界层与地面动量交换明显, 加之低空急流的动量下传和强下沉运动作用, 地面风速持续增大至本场出现大风, 26 日 05:00—08:00 风速变化率明显减小, 出现强上升运动, 湍流活动与动量下传减弱, 07:00—09:00 地面风速不断减小至出现风间歇, 但与此同时风速变化率突然增大后又减小, 锋后残余冷空气影响本场, 地面风速再次迅速增大, 本场出现二次起风, 10:00 后地面风速逐渐减小。此过程低空风速变化率减弱后约 2 h 本场出现地面风间歇, 风速变化率再次增强后本场大风二次起风, 激光测风雷达对低空湍流强度的监测能为本场预报大风的风间歇和二次起风提供一定参考。

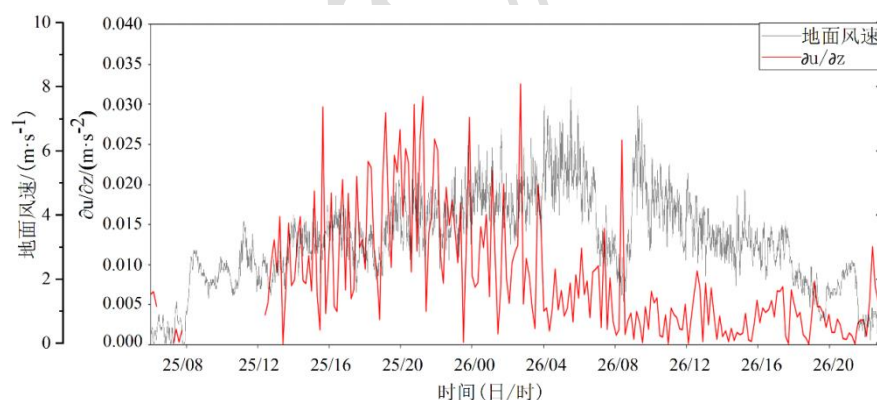


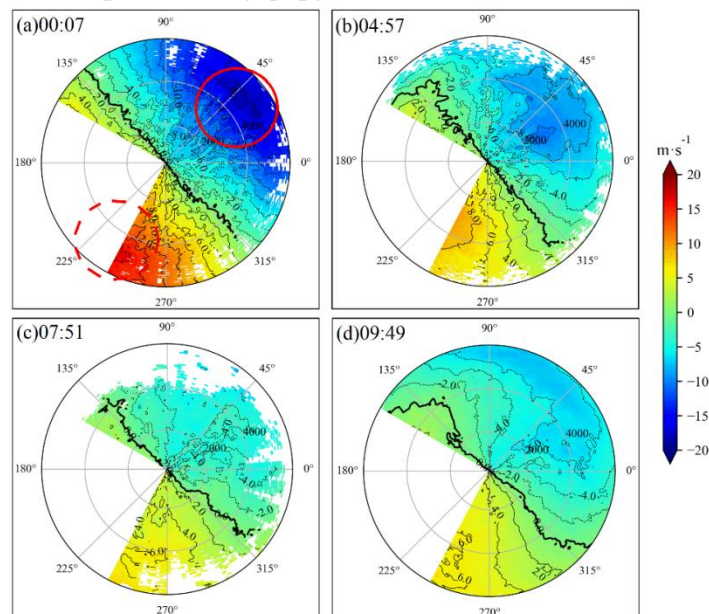
图 6 2021 年 12 月 25 日 06:00 至 26 日 24:00 地面风速与激光测风雷达 DBS 模式测风速随高度变化率对比

Fig.6 Comparison chart of ground wind speed and lidar DBS mode wind speed variation with height from December 25, 2021, 06:00 to December 26, 24:00

4.2 激光测风雷达水平风场探测

从 PPI 模式 12° 仰角探测的水平风场来看, 12 月 26 日 00:07 在雷达东北方向约 5 km 处有径向速度负值中心 (图 7a), 由于塔台遮蔽, 在西南方向同样距离能看到一个不完整的径向速度正值中心, 两个中心构成“牛眼”结构 (图 7a 中红圈), 表明本场高层存在东

211 北风急流。根据速度等值线向雷达中心收敛这一特征，表明风向不随高度变化。同时段 PPI
212 模式 4° 仰角探测到的低层风速增加不明显（图略）。直至 01:38，PPI 模式的 4° 仰角图上
213 才出现大片分布不均匀的 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速大值区（图 8a），尽管径向风等值线大致向雷达中
214 心收敛，但等值线较为凌乱，尤其是在东北方向可以清晰看到径向风空间上的不均匀性。
215 04:57 径向风正负值闭合中心靠近至雷达中心约 3 km 处，反映出东北风急流减弱且高度降
216 低。靠近图像边缘的径向风等值线表现出反 S 型特征，表明高空伴有冷平流（图 7b），此
217 时本场低层风速也有所减弱（图 8b）， $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速线前沿位于雷达东北方约 2 km 处并向
218 本场靠近，06:00 本场地面出现过程最大风速，说明此过程本场高层风速比近地面风速先增
219 大，监测到大风速区向雷达中心不断移动时需要加以关注，水平风场的风速增加具有不均匀
220 性，与 DBS 模式探测到的垂直风场变化特征一致。地面风间歇前约 1 h 的 07:51 图上可以看
221 到（图 7c），高低空风速和风向趋于一致，高层急流已消失，没有明显的温度平流（图 7c），
222 低层风速也随之明显减小（图 8c）。本场地面大风二次起风的 10:00 前后，本场高层风速
223 略有增加，风场呈现明显的反 S 型（图 7d），反映出本场高层有冷平流补充，与前文温度
224 平流剖面变化特征一致，同时低层风场再次出现 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 负值中心位于雷达东北方约 4 km
225 处，等值线较第一次起风更平滑，反映出风场的空间分布较为均匀（图 8d）。综合来看，
226 激光测风雷达 PPI 扫描模式可以实时监测低空风场变化情况并提前 $1.0 \sim 1.5 \text{ h}$ 对可能出现的
227 地面大风预警，也可以对本场上空的冷暖平流进行实时监测，在实际业务保障中可以将 DBS
228 与 PPI 扫描模式结合使用，有益于了解大风的三维结构及演变。



注：填色区域负值表示风向靠近雷达，正值表示风向远离雷达；等值线表示等径向风速线；红圈为雷达速度图“牛眼”结构，黑粗线为0 风速线。

图 7 2021 年 12 月 26 日 (a) 00:07, (b) 04:57, (c) 07:51, (d) 09:49 仰角 12°水平风场
Fig.7 December 26, 2021, (a) 00:07, (b) 04:57, (c) 07:51, (d) 09:49, 12°elevation angle horizontal wind field

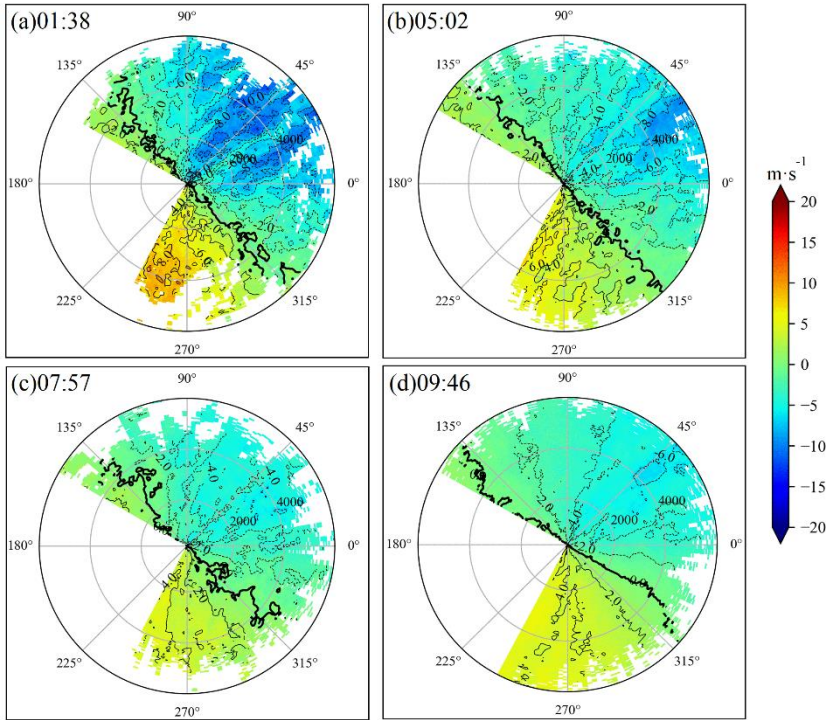


图 8 2021 年 12 月 26 日 (a) 01:38, (b) 05:02, (c) 07:57, (d) 09:46 仰角 4°水平风场
Fig.8 December 26, 2021 (a) 01:38, (b) 05:02, (c) 07:57, (d) 09:46 Elevation Angle 4°Horizontal Wind Field

5 结论

- (1) 此过程锋面过境前本场 900 hPa 高度风速最先增加，而后 850 hPa 风速才逐渐增大，锋面影响使本场上空湍流活动增强、动量交换频繁，加之低空急流动量下传与强下沉气流的影响，本场出现地面大风，影响了当日飞行训练。
- (2) 通过激光测风雷达探测的垂直风场发现此过程本场自观系统探测的地面大风出现时间滞后于低空急流减弱时间约 4-6 h，动量下传与垂直运动变化情况均具有明显的不均匀性，受冷空气影响时本场上空的冷平流与下沉气流有利于低空急流动量下传从而使地面风速增大出现大风，暖平流与上升气流会阻碍低空急流动量下传从而使风速减小出现风间歇，低空风速变化率减弱后约 2 h 本场出现地面风间歇。
- (3) 激光测风雷达 12° 仰角 PPI 扫描可以提前 1-1.5 h 对本场下滑道及地面可能出现的大风进行预警，将 DBS 与 PPI 扫描模式结合使用对了解大风的三维结构及演变有很大帮助，锋后残余冷空气仍可能会导致本场近地面的二次起风，在未来业务保障中需注意该情况。

251 (4) 与传统测风方式相比,激光测风雷达能同时监测本场低空垂直风场和水平风场的精
252 细化演变情况,不仅满足航空气象业务需求,还能实时监测低空急流、垂直运动、
253 湍流强度及冷暖平流的情况,为预报本场大风及其风间歇和二次起风提供了新的思
254 路和方法。

255 参考文献

- 256 曹倩,郭建平,孙玉萍,等,2024.2015-2023年江西雷暴大风特征分析[J].气象,50(12):1495-1508. Cao Q, Guo J P, Sun Y P, et al,
257 2024. Analysis on the characteristics of thunderstorm gale in Jiangxi Province during 2015-2023[J]. Meteor Mon, 50(12): 1495-1508 (in
258 Chinese).
- 259 陈阳权,朱雯娜,尹才虎,等,2024.一次东南大风天气下近地面风场结构及航空影响分析[J].沙漠与绿洲气象,18(4):8-14. Chen
260 Y Q, Zhu W N, Yin C H, et al, 2024. Analysis of near-surface layer wind field structure and aviation influence during a southeast gale[J].
261 Desert Oasis Meteor, 18(4): 8-14 (in Chinese).
- 262 傅军,李洁,吴强,2021.激光测风雷达在风场观测领域的应用及展望[J].空气动力学学报,39(4):172-179. Fu J, Li J, Wu Q, 2021.
263 Application and prospect of Dopplar lidar in the wind field observation[J]. Acta Aerody Sin, 39(4): 172-179 (in Chinese).
- 264 高帆,俞小鼎,王秀明,2023.山东较大范围致灾雷暴大风的多普勒天气雷达特征[J].气象,49(7):790-804. Gao F, Yu X D, Wang X
265 M, 2023. Doppler radar characteristics of wide-range damaging thunderstorm gales in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 49(7):
266 790-804 (in Chinese).
- 267 郭智亮,吕爱民,高聪晖,等,2019.超强台风“天兔”的大风对广州白云机场影响过程分析[J].中低纬山地气象,43(5):23-28. Guo
268 Z L, Lü A M, Gao C H, et al, 2019. Analysis on the influence process of super typhoon "Usagi" on Guangzhou Baiyun Airport[J]. Mid-
269 low Latitude Mount Meteorol, 43(5): 23-28 (in Chinese).
- 270 何志强,卢新平,王丙兰,2014.首都机场雷暴大风的初步研究[J].气象,40(11):1408-1413. He Z Q, Lu X P, Wang B L, 2014.
271 Preliminary study of thunderstorm gale at Beijing capital international airport[J]. Meteor Mon, 40(11): 1408-1413 (in Chinese).
- 272 黄轩,郑佳锋,张杰,等,2022.西宁机场一次低空风切变的结构和特征研究[J].激光技术,46(2):206-212. Huang X, Zheng J F,
273 Zhang J, et al, 2022. Study on the structure and characteristic of a low-level wind shear process that happened over Xining Airport[J].
274 Laser Technol, 46(2): 206-212 (in Chinese).
- 275 黄仪方,2011.航空气象:第2版[M].成都:西南交通大学出版社:140-142. Huang Y F, 2011. Aviation Meteorology[M]. 2nd ed.
276 Chengdu: Southwestern Jiaotong University Press : 140-142 (in Chinese).
- 277 蒋立辉,闫妍,熊兴隆,等,2016.基于斜坡检测的多普勒激光雷达低空风切变预警算法[J].红外与激光工程,45(1):0106001.
278 Jiang L H, Yan Y, Xiong X L, et al, 2016. Doppler lidar alerting algorithm of low-level wind shear based on ramps detection[J]. Inf Laser
279 Eng, 45(1): 0106001 (in Chinese).
- 280 康岚,刘炜桦,肖递祥,等,2018.四川盆地一次极端大风天气过程成因及预报着眼点分析[J].气象,44(11):1414-1423. Kang L,
281 Liu W H, Xiao D X, et al, 2018. Analysis on formation reason and forecast of an extreme gale in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 44(11):
282 1414-1423 (in Chinese).
- 283 黎玥君,马昊,勾亚彬,等,2024.冷涡影响下杭州湾一次区域性极端大风的演变和机制分析[J].气象,50(1):71-83. Li Y J, Ma H,
284 Gou Y B, et al, 2024. Evolution and formation mechanism of a regional extreme thunderstorm gale in Hangzhou Bay affected by cold
285 vortex[J]. Meteor Mon, 50(1): 71-83 (in Chinese).
- 286 梁希豪,杨寅,冯亮,等,2023.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,47(3):432-438. Liang X H, Yang
287 Y, Feng L, et al, 2023. Research on the characteristics of momentum downward gale in Yinchuan Airport based on wind LiDAR[J]. Laser
288 Technol, 47(3): 432-438 (in Chinese).

289 刘彬, 邹灵宇, 李晓鹏, 等, 2022. 云南雷暴大风天气的环境条件特征分析[J]. 气象, 48(11): 1402-1417. Liu B, Zou L Y, Li X P, et al,
290 2022. Analysis on environmental characteristics of thunderstorm gales in Yunnan[J]. Meteor Mon, 48(11): 1402-1417 (in Chinese).
291 刘婧茹, 李英, 孟青, 等, 2023. 中国东南地区热带气旋大风及其伴随天气的统计特征[J]. 大气科学, 47(4): 1024-1038. Liu J R,
292 Li Y, Meng Q, et al, 2023. Statistical characteristics of tropical cyclone gale and its accompanying weather in southeast China[J]. Chin J
293 Atmos Sci, 47(4): 1024-1038 (in Chinese).
294 龙柯吉, 康岚, 罗辉, 等, 2020. 四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J]. 气象, 46(2): 212-222. Long K J, Kang L, Luo H, et al,
295 2020. Statistical analysis of radar echo characteristics of thunderstorm gales in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 46(2): 212-222 (in
296 Chinese).
297 吕美仲, 侯志明, 周毅, 等, 2004. 动力气象学[M]. 北京: 气象出版社: 163. Lü M Z, Hou Z M, Zhou Y, et al, 2004. Dynamic
298 Meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press: 163 (in Chinese).
299 任菊章, 杨雪, 陶云, 等, 2025. 冬季横断山区一次低空风切变诊断及模拟[J]. 应用气象学报, 36(1): 77-89. Ren J Z, Yang X, Tao Y,
300 et al, 2025. Diagnosis and numerical simulation of low-level wind shear over the Hengduan mountains in winter[J]. J Appl Meteor Sci,
301 36(1): 77-89 (in Chinese).
302 汤浩, 陆汉城, 储长江, 等, 2020. 天山峡谷穿谷急流触发强下坡风暴的中尺度特征分析[J]. 气象, 46(11): 1450-1460. Tang H, Lu H
303 C, Chu C J, et al, 2020. Mesoscale analysis of severe downslope windstorm caused by gap jet in Tianshan Mountain canyon[J]. Meteor
304 Mon, 46(11): 1450-1460 (in Chinese).
305 王艳兰, 王娟, 伍静, 等, 2021. 桂林市 2019 年“3.21”极端大风与“4.24”致灾冰雹过程特征对比分析[J]. 热带气象学报, 37(2):
306 175-185. Wang Y L, Wang J, Wu J, et al, 2021. Comparative analysis of characteristics of “3.21” extreme gale and “4.24” hailstorm in
307 Guilin in 2019[J]. J Trop Meteor, 37(2): 175-185 (in Chinese).
308 王楠, 尹才虎, 刘晓明, 等, 2023. 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, 47(4): 565-571. Wang N,
309 Yin C H, Liu X M, et al, 2023. Analysis of LiDAR in a cold front low-level wind shear in Urumqi Airport[J]. Laser Technol, 47(4):
310 565-571 (in Chinese).
311 王婷婷, 朱文剑, 姚凯, 等, 2023. 2021 年吉林中部一次极端雷暴大风的中尺度成因分析[J]. 气象, 49(10): 1215-1226. Wang T T,
312 Zhu W J, Yao K, et al., 2023. Mesoscale analysis of an extreme thunderstorm gale in central Jilin Province in 2021[J]. Meteor Mon,
313 49(10): 1215-1226 (in Chinese).
314 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 等, 2019. 一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究[J]. 气象学报, 77(5): 785-805. Wu F F,
315 Yu X D, Wang H, et al, 2019. An observational study of multi-scale structural features of MCC on the coast of the Yellow Sea[J]. Acta
316 Meteor Sin, 77(5): 785-805 (in Chinese).
317 吴海英, 孙继松, 慕瑞琪, 等, 2023. 一次强对流过程中两种不同类型风暴导致的极端对流大风分析[J]. 气象学报, 81(2): 205-217.
318 Wu H Y, Sun J S, Mu R Q, et al, 2023. Analysis of extreme convective gusts caused by two types of weather storms during a strong
319 convection event[J]. Acta Meteor Sin, 81(2): 205-217 (in Chinese).
320 吴俊杰, 徐足音, 王耀辉, 等, 2023a. 相干测风激光雷达探测效能评估研究[J]. 激光技术, 47(5): 716-722. Wu J J, Xu Z Y, Wang Y
321 H, et al, 2023a. Evaluation of detection efficiency of coherent wind LiDAR[J]. Laser Technol, 47(5): 716-722 (in Chinese).
322 吴俊杰, 王耀辉, 徐足音, 等, 2023b. 基于多普勒激光雷达的机场边界层高度研究[J]. 激光技术, 47(6): 778-785. Wu J J, Wang Y H,
323 Xu Z Y, et al, 2023b. Research on airport boundary layer height based on Doppler LiDAR[J]. Laser Technol, 47(6): 778-785 (in
324 Chinese).

325 杨绚, 张立生, 杨琨, 等, 2020. 台风大风低矮房屋易损性及智能网格预报的应用[J]. 气象, 46(3): 429-440. Yang X, Zhang L S,
326 Yang K, et al, 2020. Typhoon vulnerability of typical low-rise buildings and application of intelligent grid forecast[J]. Meteor Mon, 46(3):
327 429-440 (in Chinese).

328 杨欣, 王加平, 2023. 利用风廓线雷达资料分析哈尔滨机场低空急流特征[J]. 气象科技进展, 13(5): 51-55. Yang X, Wang J P, 2023.
329 Study on the characteristics of low-level jets at Harbin airport based on wind profiler data[J]. Adv Meteor Sci Technol, 13(5): 51-55 (in
330 Chinese).

331 杨亦萍, 史珩瑜, 刘力源, 等, 2022. 冬春季动量下传引发浙江沿海灾害大风过程分析[J]. 海洋预报, 39(3): 66-74. Yang Y P, Shi H
332 Y, Liu L Y, et al, 2022. Analysis of the disastrous gale caused by downward transportation of momentum in the coastal areas of Zhejiang
333 province in winter and spring[J]. Mar For, 39(3): 66-74 (in Chinese).

334 张彧, 2025. 中国低空经济发展促进法的理据与图景[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 38(1): 71-84. Zhang Y, 2025.
335 Rationale and vision of the law on promoting the development of China's low-altitude economy[J]. J Beijing Univ Aeronaut Astronaut
336 (Soc Sci Ed), 38(1): 71-84. (in Chinese).

337 赵文凯, 单雨龙, 赵世军, 2020. 激光测风雷达监测低空风切变研究进展[J]. 气象水文海洋仪器, 37(4): 97-100, 104. Zhao W K,
338 Shan Y L, Zhao S J, 2020. Research progress of low-level wind shear detection by laser radar[J]. Meteor Hydrol Mar Instrum, 37(4):
339 97-100, 104 (in Chinese).

340 朱男男, 赵玉娟, 王彦, 等, 2023. 渤海西岸一次极端大风的特征和成因分析[J]. 气象科技, 51(6): 858-866. Zhu N N, Zhao Y J,
341 Dong D B, Yang S Z, Weng N Q, et al, 2021. Analysis of observation performance of a mobile coherent Doppler wind lidar using DBS
342 scanning mode[J]. J Phys: Conf Ser, 1739(1): 012048.

343