

文章编号: 1001-3806(2022)02-0206-07

西宁机场一次低空风切变的结构和特征研究

黄轩^{1,2}, 郑佳锋^{1*}, 张杰¹, 马晓玲², 田维东², 华志强²

(1. 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; 2. 中国民航 青海空管分局 气象台, 西宁 810000)

摘要: 低空风切变是航空安全的重大威胁, 为了研究高原机场典型低空风切变精细结构和演变规律, 针对西宁机场 2020-02-13 出现的两类低空风切变过程, 利用 FC-III 型激光测风雷达资料, 结合地面实况和风廓线雷达资料进行了分析。结果表明, 两类风切变成因和演变特征有所差异, 顺风切变线呈“锥形”, 由机场西侧向东“嵌入”跑道, 而逆风辐合线则呈“弓状”, 自东向西影响机场, 最大风速均超过 20m/s; 风场垂直结构具有不同特征, 超过 15m/s 风速带向下传播造成顺风切变, 逆风切变时风向首先在近地面变化超过 160°; 两次过程下滑道模式相邻时刻风速差均超过 15m/s。高时空分辨率激光测风雷达能较好地探测到风切变的演变过程和精细结构, 这对提高航空安全保障具有重要意义。

关键词: 激光技术; 低空风切变; 航空安全; 垂直结构; 演变特征

中图分类号: TN958.98; P412.25

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.02.010

Study on the structure and characteristic of a low-level wind shear process that happened over Xining Airport

HUANG Xuan^{1,2}, ZHENG Jiafeng¹, ZHANG Jie¹, MA Xiaoling², TIAN Weidong², HUA Zhiqiang²

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmosphere Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Meteorological Observatory, Qinghai Air Traffic Management Sub-bureau, Civil Aviation Administration of China, Xining 810000, China)

Abstract: Low-level wind shear is a major threat to aviation safety. To study the fine structure and evolution of typical low-level wind shear in plateau airports, for the two types of wind shear caused by different synoptic processes at Xining Airport on 2020-02-13, FC-III wind lidar data combined with wind profile radar and other data were analyzed. The results show that the causes and evolution characteristics of the two types of wind shear are different, the tailwind shear line exhibits as a “cone” and affects the runway from west to east, while the moving path of the headwind shear line is opposite, the maximum wind speed exceeds 20m/s. The vertical structure of the wind field has different characteristics, the wind speed of more than 15m/s propagates downwards causing tailwind shear; for the headwind shear, wind direction changes over 160° in the near-surface layer; in the two processes, wind speed difference between adjacent moments in the glide path mode both exceed 15m/s. The formation and development of the two types of low-level wind shear in the plateau winter are rapid. The high-resolution three-dimensional scanning lidar can detect the evolution process and fine structure of the wind shear, which is significant to improving aviation safety.

Key words: laser technique; low-level wind shear; aviation safety; vertical structure; evolution characteristics

引言

低空风切变是指 600m 以下风向或风速在水平或垂直方向的突然变化^[1]。在航空飞行中, 低空风切变极易对处在起飞爬升或进近着陆阶段的飞机带来安全隐患, 严重时会导致飞机失速甚至坠毁。低空风切变往往还具有持续时间短、尺度小、突发性强等特点, 通常难以被常规气象设备捕捉到^[2-3]。因此, 在我国民航和通用航空业高速发展的背景下, 加强对低空风切变

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1505702); 成都信息工程大学人才引进项目 (KYTZ201728); 中国民航青海空管分局内部项目

作者简介: 黄轩 (1992-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事激光测风雷达航空气象预报应用的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zj1988@cuit.edu.cn

收稿日期: 2021-03-03; 收到修改稿日期: 2021-04-12

的探测和研究具有重要意义和实际价值。

目前,国内外在低空风切变的精细化预警预报上还存在很大不足,主要原因是对低空风切变探测能力的欠缺。机场配备可用于探测低空风切变的设备包括:超声波测风仪、多普勒天气雷达、风廓线雷达和激光测风雷达^[4]。超声波测风仪性能可靠,但仅能对地面单点的风场进行有效监测^[5];多普勒天气雷达具有扫描范围广、测量高度高等优点,但其对垂直风场的探测能力十分有限,且仅能探测到云雨内部的风切变,而对晴空条件下的低空风切变则无法获取有效回波^[6-7];风廓线雷达是目前气象业务领域探测垂直风场的主要设备之一,其丰富的资料包括垂直气流、大气折射率常数等,十分有利于垂直风切变的观测和研究,但其不具备全方位扫描能力,因此无法对水平风切变进行有效监测^[8-9]。

近年来,激光多普勒测风雷达发展十分迅猛。2002年,PEARSON 等人^[10-11]研制出 $1.548\mu\text{m}$ 的全光纤脉冲多普勒激光雷达。2004年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)开展了 $2\mu\text{m}$ 的相干激光雷达研究,并完成机载观测试验^[12-14]。2011年,西南技术物理研究所研制出一台 $1.55\mu\text{m}$ 全光纤激光测风雷达,并进行了探测性能验证^[15-16]。2014年,中国科学院上海光学精密机械研究所研制出了 $1.54\mu\text{m}$ 的激光雷达测风系统,并用于边界层风廓线探测^[17]。实验和研究表明,相对于其它设备,激光雷达具有更高的测风精度和时空分辨率,以及更加灵活的扫描能力等,尤其对低空风场的精细结构和变化都具备良好的探测效果和监测能力^[18]。FAN 等人^[16,19]验证了激光雷达在高原机场晴、阴和雾霾条件下的探测效果,结果表明:激光测风雷达测风精度高、可靠性好,且能精准捕捉到低空风场时空尺度上的变化和特征。WANG 和 LIU 等人^[20-21]在北京奥运会期间,利用激光测风雷达与海面浮标进行海面风监测对比实验,证实激光测风雷达可以精确提供近实时的海面风场。

激光雷达也逐渐被用于民航机场低空风切变的探测和预警。如2002年8月香港国际机场建成以激光测风雷达为主的风切变告警系统。CHAN 等人^[22-25]对激光雷达探测到的风切变过程进行了细致的研究并对风切变识别算法进行验证,证实激光雷达十分适合在晴空状况下探测低空风切变。ZHANG 等人^[26]利用激光测风雷达和风廓线雷达资料,对2018-04-26西宁机场突发微下击暴流引起风切变进行了细致结构分析和

形成机理的研究。ZHANG 等人^[27]在北京首都国际机场进行低空风切变研究,从激光雷达多个扫描结果中识别出14次风切变过程。

西宁曹家堡国际机场(国际代码 ZLXN)于2020-02-13受强冷空气活动影响出现两次强低空风切变过程。本文中重点利用激光测风雷达资料,结合地面实况、风廓线雷达资料,对当日不同天气过程引发的两类低空风切变的演变规律和特征进行研究,旨在为高原机场风切变的预警预报和激光测风雷达应用提供参考。

1 设备和资料

本文中使用的激光雷达是一部由西南技术物理研究所研制的 FC-III 型激光测风雷达,采用多普勒脉冲、全光纤和相干体制。如图1所示,该雷达安装于 ZLXN 机场跑道南侧,海拔2184m。作为典型高原机场,ZLXN 机场建于两个细长峡谷的中间地带,南北两侧均为密集山脉,山脉平均海拔2500m以上,这种地形利于低空风切变发生。



Fig. 1 Geographical environment around Xining Caojiabao International Airport and FC-III wind lidar installation location

该雷达测量原理是通过接收大气中气溶胶粒子的后向散射回波信号,并根据信号的多普勒频移来反演大气的风向风速。雷达主要性能参量如表1所示,雷达发射激光波长为 $1.55\mu\text{m}$,俯仰扫描范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,方位扫描范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。雷达采用混合模式扫描,一次混合模式扫描包括:3个仰角层的平面位置显示模式(plan position indicator, PPI)扫描($3^\circ, 4^\circ, 6^\circ$)、2次沿机场跑道方位的距离高度显示模式(range height indicator, RHI)扫描、1次多普勒光束摆动模式(Doppler beam swinging, DBS)扫描和2次下滑道模式

Table 1 Main technical parameters of FC-III wind lidar

| parameters | value |
|------------------------------------|---|
| average power | $\leq 200\text{W}$ |
| wavelength | $1.55\ \mu\text{m}$ |
| scan range (azimuth/pitch) | $0^\circ \sim 360^\circ / 0^\circ \sim 90^\circ$ |
| detection range | $0.05\text{km} \sim 10\text{km}$ |
| range resolution | 100m |
| scanning mode | DBS/PPL/RHI/GP |
| time resolution | $\leq 2\text{s}$ |
| elevation resolution | $\leq 0.1^\circ$ |
| wind speed range | $-60\text{m/s} \sim +60\text{m/s}$ |
| wind velocity accuracy | $\leq 0.5\text{m/s}$ |
| wind angle accuracy (profile mode) | $\leq 10^\circ$ |
| measurements | radial velocity, wind profile, vertical air motion, spectrum width, signal-to-noise ratio, etc. |

(glide path, GP)扫描。一次混合模式扫描耗时 12min, 该扫描方式全天候不间断运行。雷达探测资料包括: 径向速度、水平风向风速、垂直风向风速、谱宽和信噪比等。

2 天气形势和实况

为了解此次低空风切变的天气背景, 对 2020-02-13 的天气形势进行分析。500hPa 上欧亚大陆整体呈典型“两槽一脊”形势, 高空槽控制内蒙古至甘肃地区, 槽后强偏北风不断引导冷空气南下, ZLXN 机场位于槽后偏西北气流中。地面锋面在 6h 内向南移动 $2^\circ \sim 3^\circ$, 其南压过程中河西走廊地面风速激增。这种天气形势, 易引发午后西风气流动量下传^[28], 造成青海省大部地区偏西大风。而傍晚时段伴随地面冷锋南压, 造成偏东大风, 影响机场区域。

根据 13 日机场观测记录, 14:45 前后高空风下传导致地面极大风速迅速从 6m/s 增至 19m/s , 顺风差超过 13m/s , 引起顺风切变。此后, 地面西风平均风速维持在 $9\text{m/s} \sim 13\text{m/s}$ 。17:35 地面偏东风迅速增大, 极大风速 17m/s , 东风和西风的交汇在机场形成了地面风场辐合线, 在机场进近区域引起一次持续时间近 20min 的低空逆风切变过程。同时, 利用 13 日 12:00 ~ 24:00 机场风廓线雷达资料对空中水平风变化进一步分析。如图 2 所示, A 和 B 分别表示自动观测系统监测到的两次低空切变时刻, 13:30 后, 0.5km 以下 C 区域内, 近地风速增大至 8m/s 并有继续增加的趋势; 18:00 ~ 19:00 时, 低层吹沙天气增强, 导致风廓线雷达无法测量风场 (逆风切变已经发生); 19:00 后, 1.0km 以下已转为偏东风控制, 风速在近地面达 20m/s

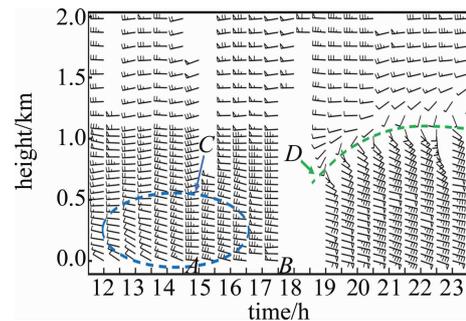


Fig. 2 Time-height change of the horizontal wind profiles produced by the wind profiler radar during two wind shear events from 2020-02-13T12:00 to 23:00

以上, 1.0km 左右绿色虚线 D 表明存在垂直切变层。

3 两类低空风切变的演变规律和特征结构

风廓线雷达不具备立体扫描能力, 无法探测到低空风切变的时空变化过程。因此, 作者利用分辨率更高、扫描模式更全面的激光测风雷达, 分别利用 PPI, RHI, DBS 和 GP 4 种扫描模式的资料对当日午后“顺风”和“逆风”两类低空风切变进一步细致分析。

3.1 顺风切变风场结构

图 3 为 2020-02-13T14:25 ~ 14:56 激光雷达不同时刻 PPI 径向速度图。其中正、负径向速度分别表明目标气流指向或远离雷达, 黑色长方形代表机场跑道, 西侧为 11# 跑道入口, 东侧为 29# 跑道入口。可见, 14:23 时, 径向速度在东西两侧分布较均匀, 环境风为偏西风; 至 14:25, 跑道范围内风向稳定, 但在西北侧

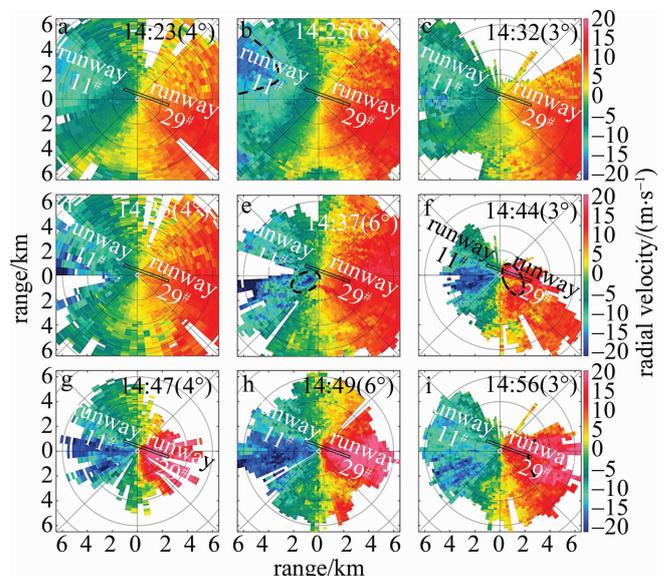


Fig. 3 PPI images of lidar-measured radial velocity at different times and different elevations

a ~ i—14:23 (4°), 14:25 (6°), 14:32 (3°), 14:35 (4°), 14:37 (6°), 14:44 (3°), 14:47 (4°), 14:49 (6°), 14:56 (3°)

4km 外(黑色虚线)出现了大风速区,风速超过 15m/s,此时 11#跑道西侧开始形成顺风切变并逐渐向东移动;至 14:32,11#跑道 3°仰角的径向风速仍维持在 10m/s 左右,表明风切变区域仍然较高,大风未下传至地面;至 14:35 以后,随大风速区逐渐移近雷达,顺风切变更加明显,14:37 时,大风速区前沿的辐合切变已移至 11#跑道东南侧(黑色虚线圈出),雷达相邻距离库的风速差可达 8m/s。

此外还发现,随时间推移大风速区的轴向也逐渐由“西偏北”转变为“偏西”;至 14:44,大风速区呈锥形由机场西侧“嵌入”跑道,带来地面强西风并影响跑道中段(黑色虚线圈出)。随后进一步快速向东传播,至 14:47 和 14:49,机场基本被大风覆盖,大部分超过 20m/s;至 14:56,大风影响 29#跑道,在其东侧下滑道区域(黑色虚线右侧)附近存在径向风的辐散。整个顺风切变影响机场大概 0.5h,资料反映了风切变整体的演变过程,即由冷空气动量下传造成大风和切变从空中逐步向地面传播及其在传播中移动方向的变化。

图 4a ~ 图 4d 是顺风切变 4 个典型时刻激光雷达沿跑道方向扫描的 RHI 模式径向速度图。进一步分析低空切变过程中,跑道上空大气边界层垂直风场结构的演变特征。可见,14:28 时,在距雷达观测点西北侧 2km ~ 4km 上空存在偏西大风(黑色虚线内);至 14:40,由于下传风传播特性,11#跑道外侧 1km 左右边界层中层偏西风略有加强(黑色虚线内),表明西风首先在 11#跑道一侧增大并向东传播,此时风速辐合线仍未到达地面;至 14:53,随着下沉气流影响跑道,整层风速明显增大,尤其在雷达东南侧 0.5km 以下低层风速已达 20m/s,在雷达探测点西侧 1km 以内径向速度较小,与图 3i 的特性基本一致,表明在垂直方向上该区域存在风速的辐合(右侧虚线);15:05 时,辐合区东移,雷达东南侧 4km 以东(黑色虚线内)风速分布表现出辐合特征。

DBS 模式获取的水平风廓线是监测和识别不同高度切变类型的有利工具。图 4e ~ 图 4f 所示为 2020-02-13T11:00 ~ 16:00 在 DBS 模式下不同高度的风向风速分布。可见,13 日午后背景风场稳定,整体为偏西风,在此期间背景风速在垂直方向上存在明显分层,风速的垂直变化在 1.0km 附近较显著。14:40 前,1.0km 高度和近地面存在风向转换层,风向随高度先逆转后顺转,冷暖平流交替利于高空风下传,风速垂直分布随时间则呈现出“阶梯状”,表明了下传风场的垂直结构;14:40 左右,高空大风传至地面,风速超过 20m/s。

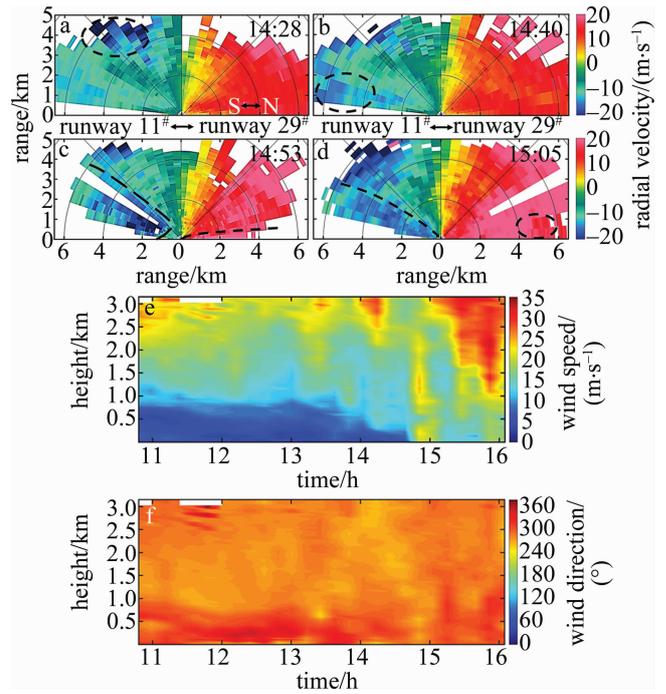


Fig. 4 RHI and DBS images of lidar-measured at different times a ~ d—the radial velocity of RHI mode at 14:28, 14:40, 14:53, 15:05 e, f—the result of wind speed and direction measured by DBS mode

飞行器需沿预设轨道降落,基于风切变的突发性和偶然性,针对当前使用跑道下滑道区域采用下滑道模式探测有效距离范围内顺、逆风廓线可以获取飞机降落关键区不同位置风切变信息,径向数据表明该区域上风速分布及变化情况。图 5 表明,在顺风切变过程中,11#跑道由于下传风而导致风廓线出现较大波动。14:19 和 14:31 时刻,廓线中风速随距离增加,表明高层风速明显大于低层;而 14:19 时,下滑道坡道上距雷达 1.5km ~ 4.0km 区域内显著的逆风增加和减弱同时存在(见图中黄色阴影区 2),风速扰动与图 4 中 DBS 模式低层风场阶段变化相似;14:31 时,未表现出明显气流波动。风速强烈变化发生在 14:31 和 14:43 之间,近地面逆风风速增加最大超过 7.7m/s,

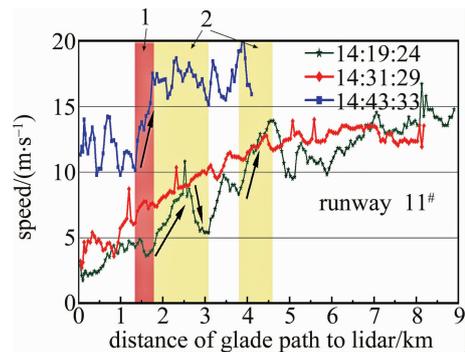


Fig. 5 Wind information of lidar glide path mode at 11# corridor from 2020-02-13T 14:19 to 14:43

在 14:43 时,出现逆风剧烈变化(见图中红色阴影区 1),200m 范围内逆风风速增加近 7.7m/s。

3.2 逆风切变风场结构

本节中对逆风切变的演变规律和特征进行分析。图 6 中给出了 2020-02-13T17:25 ~ 17:58 时期间激光雷达不同仰角 PPI 模式径向速度图。17:25 时,机场周边以偏西北风为主,在 29# 跑道东南侧黑色虚线区域内观测到水平尺度 200m ~ 400m 的空气乱流;17:26 时,也观察到相同现象,表明冷空气前沿已移至机场东侧,低空辐合线在机场区域内逐渐形成;该区域内负径向速度小,表明先遣冷空气强度较弱。

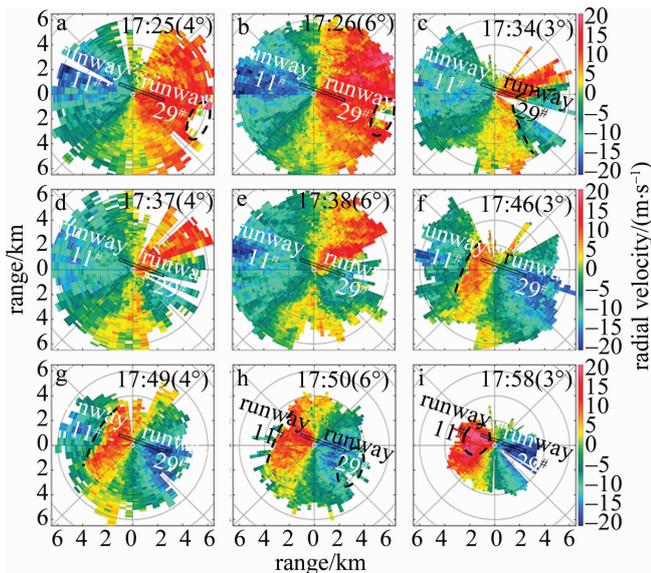


Fig. 6 PPI images of lidar-measured radial velocity at different times and different elevations

a ~ i—17:25 (4°), 17:26 (6°), 17:34 (3°), 17:37 (4°), 17:38 (6°), 17:46 (3°), 17:49 (4°), 17:50 (6°), 17:58 (3°)

随后,低层的东风明显增强,向西传播的逆风辐合线前沿在 17:34 时已移至 29# 跑道头,径向辐合线呈“弓”状结构。17:34 ~ 17:38 时,辐合线逐渐到达雷达本站,风切变结构仍然维持,冷空气的提供动量使得辐合切变线仍然不断向西传播;17:46 ~ 17:50 时,低空切变线西移穿过雷达,但辐合线曲率有所减小;雷达东侧冷空气较前一时段明显增强,大部分区域风速超过 15m/s;至 17:58,冷空气主体侵入机场跑道范围,此时在跑道东西端均有大风速气团,径向速度超过 20m/s。

图 7a ~ 图 7d 为逆风切变过程雷达 RHI 扫描的 4 个时刻径向速度图。可见,17:30 时,边界层大气分布均匀,环境风场以偏西风为主;至 17:42,随着锋后冷空气移向机场范围,雷达探测到冷锋前沿,雷达东侧 4km 处近地层黑色虚线区域内,风向存在明显转向,0.5km 高度以下风向辐合切变线初步形成。

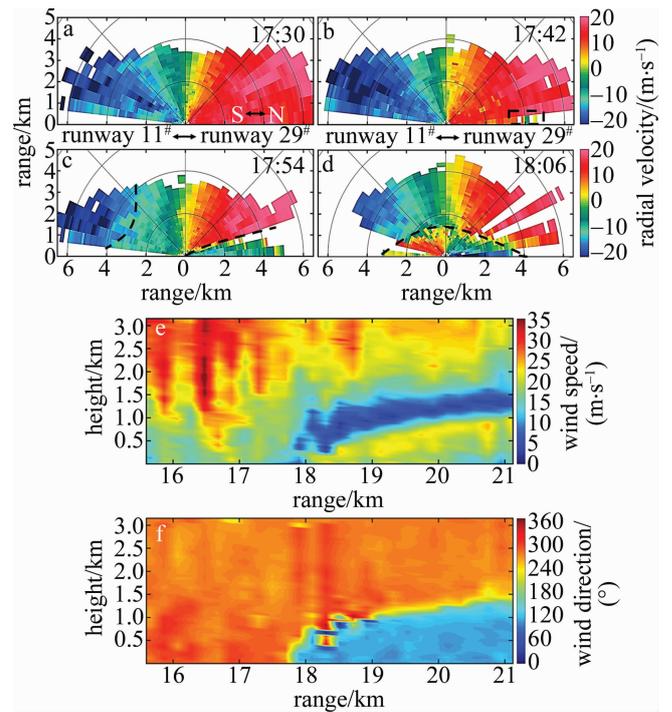


Fig. 7 RHI and DBS images of lidar-measured at different times a ~ d—the radial velocity of RHI mode at 17:30, 17:42, 17:54, 18:06 e, f—the result of wind speed and direction measured by DBS mode

冷空气主体呈“楔形”侵入,逐渐影响跑道区域,在 17:54 时,雷达东侧的黑色虚线区分了两种不同性质气团控制下的大气风场,形成了清晰的冷空气垂直轮廓,同时,在东西风共同作用下,雷达西侧 4km 以内(黑色曲线以东)风速明显减弱,区域内风场平均风速小于 10m/s;18:06 时,雷达上空 1km 范围内(黑色虚线下方)转为偏东气流控制,0.5km ~ 1.0km 高度层之间存在较强风向垂直切变。RHI 资料反映了锋后冷空气过境在垂直方向上产生性质不同的气团,由冷锋后冷空气引起的风切变垂直结构受系统影响,在东移过程中逐渐从地面向中层传播并在最后形成稳定垂直切变层。

DBS 模式探测在 16:00 ~ 21:00 期间不同高度水平风速、风向随时间变化,见图 7e ~ 图 7f。激光雷达揭示了风切变在不同阶段的结构变化特点,17:45 前,上游高空大风移至机场上空,500m 以上风场主要受西风急流控制;17:45 时,当地面有冷空气侵入,地面风向由西北迅速转为东南向,风速则明显减弱。此后,风向切变随时间表现出明确的坡度,0.5km ~ 1.5km 高度层逐渐形成东风低值带,其上下侧有明显风速或风向切变。由此可见,冷空气过境造成风向和风速变化在空间垂直分布是中上层明显滞后于下层。此次过程引起的低空风切变类型包括水平方向上的辐合切变,

以及垂直方向上风向和风速切变。

由于辐合线演变特点,选择29[#]跑道下滑道廓线,如图8所示。图中红色阴影区域1代表逆风切变区域,黄色阴影区域2表明径向风有较大幅度波动。17:32时,表明此时风场为较强逆风,且整条廓线风速在10m/s~17m/s,无显著波动,随辐合线形成并逼近雷达;17:44时,在距雷达800m范围内出现5m/s顺风,距上一时刻风速差超过15m/s,下滑坡道800m~1000m处阴影和箭头表明该区域存在逆风到顺风的低空切变,风速差超过7.7m/s;由17:32和17:56时的廓线可知,17:44时,阴影区域顺、逆风均不足5m/s是由于背景风和冷空气相互作用导致的。

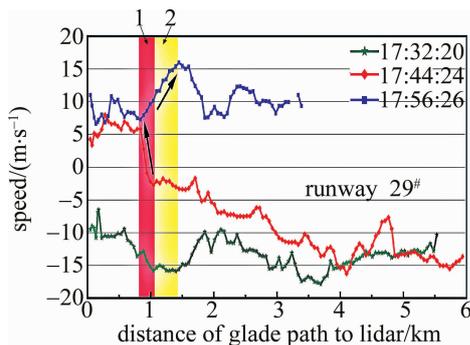


Fig. 8 Wind shear information of lidar glide path mode at 29[#] corridor from 2020-02-13T17:32 to 17:56, pink shadow show headwind shear area and yellow shadow yield indicate radial velocity change rapidly

4 结 论

低空风切变对航空飞行具有重大威胁,尤其在低空垫面风场复杂多变的高原机场,相比传统气象设备,激光测风雷达是目前探测晴天低空风切变的最有效的工具之一。本文中利用激光测风雷达多种观测模式资料,结合再分析资料、地面实况和风廓线雷达资料对2020-02-13影响西宁机场的两种不同类型低空风切变的演变规律和结构特征进行了研究。

(1)午后中高层西风急流动量下传导致低空顺风风切变的主要原因。在下传期间,3.0km以下各层风速均随时间有突然变化,在低空风切变出现阶段整层风速则可达更强;风切变演变过程中,大风和风速辐合线从空中呈现出“锥形”,逐步下沉并穿越跑道向东传播,切变线后部大风速区风速超过20m/s。

(2)冷锋过境后,冷空气在青海省东部河谷地区倒灌,进而在机场东部形成较强的东南气流和逆风切变,当冷空气主体进入雷达探测范围时,雷达可清晰捕捉到低空小尺度乱流;逆风切变形成的辐合线呈“弓”状,自东向西传播,并在机场两侧形成性质不同的大风

速气团,速率为10m/s~15m/s,强烈的东风和西风在跑道上空对峙。

(3)两类风切变特征有显著差异,顺风切变表现为大风速带的垂直自上向下传播,首先到达地面的气团携带更强动能,切变形成初期风速迅速增加,1min内风速变化超过12m/s;冷锋引起逆风切变时,风向首先在近地层剧烈变化,受东西风共同作用,低层风速先减小后增大,东风逐渐向中层转播至1.5km高度层,并在该层形成稳定垂直风切变层。

(4)高原冬季,风切变的发展演变迅速且强度大;通过高分辨率、多种观测模式的激光测风资料,可以有效对低空风切变进行较为全面的探测预警,可以获取风切变演变过程的规律和细微结构。

参 考 文 献

- [1] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Manual on low-level wind shear[M]. Ottawa, Canada: International Civil Aviation Organization, 2005: 5-27.
- [2] 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.
- [3] 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).
- [4] TANG M, ZHUANG W F. Detective technology of low-level wind shear[J]. Air Traffic Management, 2005(5): 47-49(in Chinese).
- [5] CUI G H, CAO K J, ZHU Y B. Design of ultrasonic anemometer measurement system with high sensitivity based on C8051F020[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(11): 2158-2160 (in Chinese).
- [6] HU M B, TAN Sh Q, TANG D Zh, *et al.* A study on the method for detecting low-level wind shear over airport with single Doppler radar [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2000, 23(1): 113-118(in Chinese).
- [7] HU J M, LIU F, HUANG Y M, *et al.* Doppler radar echo characteristics of hail and low-level wind shear weather[J]. Guangdong Meteorology, 2008, 30(1): 24-28(in Chinese).
- [8] HU M B, XIAO W J. The preliminary study on analysis method of wind shear using wind profiler[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2010, 30(4): 510-515(in Chinese).
- [9] WANG L, WANG G R, GU Y, *et al.* Application of wind profiler radar vertical radial[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(3): 290-296(in Chinese).
- [10] PEARSON G N, EACOCK J R. A fiber-based coherent pulsed Doppler lidar for atmospheric monitoring [J]. Proceedings of the SPIE, 2002, 4484: 51-57.
- [11] PEARSON G N, ROBERTS P J, EACOCK J R, *et al.* Analysis of the performance of a coherent pulsed fiber lidar for aerosol backscatter applications[J]. Applied Optics, 2002, 41(30): 6442-6450.
- [12] JEFFREY Y B, GRANT E A, GRADY J K, *et al.* Noise whitening in airborne wind profiling with a pulsed 2-micron coherent Doppler lidar at NASA Langley Research Center [J]. Proceedings of the

- SPIE, 2012, 8379:83790N.
- [13] MICHAEL J K, GRADY J K, MULUGETA P, *et al.* Testbed Doppler wind lidar and intercomparison facility at NASA Langley Research Center[J]. Proceedings of the SPIE, 2004, 5653: 167-174.
- [14] GRADY J K, MULUGETA P, BRUCE W B, *et al.* Validar: A testbed for advanced 2-micron Doppler lidar[J]. Proceedings of the SPIE, 2004, 5412: 87-98.
- [15] FENG L T, GUO H Q, CHEN Y, *et al.* Experiment of all-fiber Doppler lidar at 1.55 μm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 844-847(in Chinese).
- [16] FAN Q, ZHU K Y, ZHENG J F, *et al.* Detection performance analysis of all-fiber coherent wind lidar under different weather types[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210003(in Chinese).
- [17] PAN J Y, WU Sh Y, LIU G, *et al.* Wind measurement techniques of coherent wind lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1720-1724(in Chinese).
- [18] 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.
- [19] 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).
- [20] WANG G L, LIU L P, LIU Z S, *et al.* The application of sea-surface wind detection with Doppler lidar in Olympic sailing[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(6): 1471-1480.
- [21] LIU Z S, WANG Z J, WU S H, *et al.* Fine-measuring technique and application for sea surface wind by mobile Doppler wind lidar[J]. Optical Engineering, 2009, 48(6): 066002.
- [22] CHAN P W. Application of LiDAR-based *F*-factor in wind shear alerting[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2012, 21(2): 193-204.
- [23] CHAN P W, SHUN C M. Aviation applications of the pulsed doppler LiDAR-experience in Hong Kong[J]. The Open Atmospheric Science Journal, 2009, 3(1): 138-146.
- [24] 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): 637-655.
- [25] 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.
- [26] 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).
- [27] ZHANG H W, WU S H, WANG Q Ch, *et al.* Airport low-level wind shear lidar observation at Beijing Capital International Airport[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96: 113-122.
- [28] WU Zh X, WANG Sh G, SHANG K Zh, *et al.* The characteristic of momentum transfer during a cold strong wind process[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 467-473(in Chinese).