

# 基于相干多普勒测风激光雷达的不同成因类型的低空风切变观测

刘晓英<sup>1</sup>, 吴松华<sup>1,2\*</sup>, 张洪玮<sup>1</sup>, 何志强<sup>3</sup>, 张建军<sup>3</sup>, 王筱晔<sup>1</sup>, 陈晓敏<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学海洋高等研究院信息科学与工程学院海洋遥感研究所, 山东青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东青岛 266237;

3. 中国民用航空华北地区空中交通管理局气象中心, 北京 100621)

**摘要:**为实现不同成因类型的低空风切变观测,利用两台相干多普勒测风激光雷达在北京首都国际机场展开试验观测。针对干性雷暴和地形引起的两类风切变,分别采用多普勒波束摆动(Doppler Beam Swing,简称DBS)和下滑道两种扫描模式进行风切变的探测与识别。结果表明,DBS模式风切变识别方法可有效识别干性雷暴引起的水平低空风切变,下滑道模式可有效识别地形诱导的下滑道顺风 and 逆风风切变。干性雷暴造成的风速骤增、风向突变和上升下降气流的强烈对流是引发低空风切变的主要原因。地形诱导风切变主要由高速气流和复杂下垫面相互作用产生,具有偶发性和瞬变性的特点。

**关键词:**激光雷达; 航空安全; 低空风切变识别; 干性雷暴; 地形

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A

## Low-level wind shear observation based on different physical mechanisms by coherent Doppler lidar

LIU Xiao-Ying<sup>1</sup>, WU Song-Hua<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Hong-Wei<sup>1</sup>, HE Zhi-Qiang<sup>3</sup>, ZHANG Jian-Jun<sup>3</sup>,  
WANG Xiao-Ye<sup>1</sup>, CHEN Xiao-Min<sup>1</sup>

(1. Institute for Advanced Ocean Study, College of Information Science and Engineering, Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;

3. North China Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Beijing 100621, China)

**Abstract:** In this paper, two coherent Doppler lidars were used to observe the low-level wind shear induced by dry thunderstorms and terrain at Beijing Capital International Airport. The experiments respectively adopted Doppler Beam Swing (DBS) and Glide Path wind shear identification method to alert the wind shear of the above two types. The results show that the DBS method and Glide Path mode can respectively identify horizontal wind shear caused by dry thunderstorms and terrain. Dry thunderstorms bring sudden increase of wind velocity, abrupt change of wind direction and strong convection of updrafts and downdrafts, which causes the low-level wind shear. Terrain-induced wind shear with the transient and sporadic nature is mainly produced by the interaction between high-speed airflow and complex underlying surface.

**Key words:** lidar, aviation safety, low-level wind shear, dry thunderstorms, terrain

**PACS:** 42. 62. Eh

收稿日期: 2019-10-30, 修回日期: 2020-04-17

Received date: 2019-10-30, Revised date: 2020-04-17

基金项目: 民航安全能力建设项目(TM2017-228-1/2), 国家自然科学基金(61975191, 41905022)

**Foundation items:** Supported by Civil Aviation Security Capacity Building Project (TM2017-228-1/2), National Natural Science Foundation of China (61975191, 41905022)

**作者简介(Biography):** 刘晓英(1993—), 女, 山东寿光人, 博士研究生, 主要从事相干多普勒测风激光雷达、复杂环境激光雷达风场反演技术研究。E-mail: lxy6302@stu.ouc.edu.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: wush@ouc.edu.cn

## 引言

风切变,又称风梯度,是指相对较短距离内的风矢量(风速或风向)变化,是大气中的一种现象。低空风切变(Low-level Wind Shear),通常指距离地面 600 m 高度以内大气中风速风向的突然变化,严重威胁飞机起飞、着陆阶段的飞行安全,已得到国际航空和气象学界的广泛关注<sup>[1]</sup>。风切变在不同的专业领域有不同的分类依据,如表 1 所示。在航空气象学中,一般有两种分类标准:1)风场结构;2)飞机航迹相对于风矢量的方位。在风切变探测领域,通常依据气象雷达散射回波信号强弱进行分类。

风切变的成因主要包含两类:气象因素和非气象因素,有时是两种因素共同作用的结果。气象因素与大气运动有关,主要的天气条件有雷暴、锋面、辐射逆温型的低空急流和海陆风。雷暴是产生强烈低空风切变的重要天气活动,通常会造成两种不同的风切变:微下击暴流切变和雷暴外流切变,对航空安全威胁很大;锋面因其两侧气象要素差异较大,容易在锋面过渡区诱发风切变;在晴朗的夜间,由于较强的地面辐射降温形成逆温层,阻挡了上层大尺度气流与近地面层的混合过程和动量传递,使得高于逆温层的区域动量堆积,形成低空急流,易引起风的垂直切变<sup>[2]</sup>。地面与水面对太阳辐射的吸收不同,会造成陆地和水域上方气流温度差异,引发海陆风。海陆风也会诱发低空风切变,如香港国际机场坐落在人工岛屿上,三面环海,海风的出现会导致下滑道上逆风增加,引发低空风切变,海风形成的低空风切变强度能达到 35 km/h<sup>[3-4]</sup>。非气象因素与地理环境有关,主要指山地地形、高大建筑物及成片树木等。当强风吹经机场附近的山坡、高大建筑物及树木时,会在障碍物下风向区域产生高低风速交替的扰乱气流。若此时跑道恰好位于下风向区域,则容易诱发低空风切变。

对风切变的研究始于 20 世纪 70 年代,Fujita 教授<sup>[7]</sup>在分析了美国三次严重飞行事件后发现强下降气流是这三次坠机事故的主要诱因。此后,用于气象要素观测的设备被广泛应用到风切变探测领域,逐步建立起低空风切变预警系统(Low-Level Wind Shear Alerting System, LLWAS)<sup>[4]</sup>。传统的风切变探测手段有地基超声风速计观测网(Ground-based sonic-anemometer network)、声雷达(Sodar)以及多普勒天气雷达(Doppler weather radar),其各自的工作原理、优势及局限性<sup>[4,8-9]</sup>如表 2 所示。相干多普

表 1 低空风切变类型

Table 1 The types of low-level wind shear

航空气象学分类一:风场结构 <sup>[1]</sup>	
风的垂直切变 (Vertical Wind Shear)	水平风在垂直方向上一定距离内,两点之间的风速和(或)风向的变化。
风的水平切变 (Horizontal Wind Shear)	水平风在水平方向上两点之间风速和(或)风向的变化。
垂直气流切变 (Vertical Air Current Shear)	上升或下曳气流(垂直风)在水平方向上两点之间的变化。
航空气象学分类二:飞机航迹相对于风矢量的方位 <sup>[1-2,5]</sup>	
顺风切变 (Tail Wind Shear)	飞机从小的顺风区进入大的顺风区,或从逆风区进入顺风区以及从大的逆风区进入小的逆风区等情形,它使飞机空速减小,升力下降,是一种比较危险的风切变形式。
逆风切变 (Head Wind Shear)	飞机从小的逆风区进入大的逆风区,或从顺风区进入无风或逆风区以及从大顺风区进入小顺风区等情形,它使飞机空速增加,升力增大,比顺风切变的危害相对轻些。
侧风切变 (Cross Wind Shear)	飞机从一种侧风或无侧风状态,进入另一种明显不同的侧风状态,分左侧风切变和右侧风切变,它使飞机发生偏航、侧滑、滚转等现象,侧风较强且风速变化大时也很危险。
垂直气流切变 (Vertical Air Current Shear)	飞机从无明显升降气流区,进入强烈升降气流区的情形,特别是强烈的下击暴流,具有猝发性,使飞机突然下沉,危害最大。
风切变探测领域:气象雷达散射回波信号强弱 <sup>[6]</sup>	
湿性风切变 (Wet Wind Shear)	指由雷暴等强对流天气、锋面等天气活动引发的风切变,伴随有降雨,通常采用多普勒天气雷达进行探测。
干性风切变 (Dry Wind Shear)	又称晴空风切变,指由辐射逆温、地形障碍物等引起的风切变,通常发生在晴空条件下,一般采用激光雷达进行观测。

勒测风激光雷达(Coherent Doppler Lidar), CDL 是一种新兴遥感设备,通过向大气中发射激光并检测气溶胶粒子回波信号中的多普勒频移实现风速反演。与超声风速计的点测量相比,激光雷达可以通过灵活的扫描方式获取高分辨率的空间风场特征。与声波探测相比,激光在晴空大气中衰减较弱,探测距离更远,且不受环境噪声影响。多普勒天气雷达在雷暴等强对流天气条件下有较好的风切变探测效果,但在干洁大气中测量受限。如今,激光雷达以其高时空分辨率、低能耗、稳定便携的优点广泛应用于航空安全保障<sup>[8,10-11]</sup>、海气边界层结构研究<sup>[12]</sup>

和风电<sup>[13-15]</sup>等领域。不过在云雨天条件下,因为受到降水粒子的影响,激光能量在大气中快速衰减,激光雷达探测距离将受到一定的限制。

为实现晴空风切变的观测,香港天文台(Hong Kong Observatory, HKO)于2002年引进了一台2  $\mu\text{m}$  红外相干多普勒激光雷达对香港国际机场进行全天候风切变观测预警,在全球首次实现了机场风切变的业务化观测<sup>[16]</sup>。低空风切变具有周期短、尺度小、强度大等特点,对观测模式设计和反演识别算法提出了较高的要求。在激光雷达刚开始用于机场风切变观测之时,常采用固定仰角的PPI(Plan Position Indicator)模式,针对起飞和降落阶段分别设置了6°和3°仰角PPI扫描<sup>[16]</sup>。为有效探测地形诱发的风切变,Chan<sup>[4]</sup>和Choy<sup>[17]</sup>等人对扫描模式进行了优化,创新地提出了下滑道扫描(Glide Path Scan)模式,并开发了下滑道扫描风切变识别算法(Glide path shear alert Generation Algorithm, GLYGA)。张洪玮等人<sup>[8]</sup>针对固定仰角模式下激光扫描平面与下滑道偏离较远的问题,提出了变仰角PPI(Step-Wise Plan Position Indicator)扫描模式,将激光光束所在平面和下滑道平面的距离控制在10 m以内,保证了激光扫描区域尽可能接近飞机降落的轨迹。针对如何提高风切变反演识别算法的预警率, HKO根据多年激光雷达观测数据和飞行数据进行风切变识别算法优化:斜坡检测方法通过对初始斜坡长度进行收缩与扩张,计算风切变发生的最大速度变化率,进而得到更准确的风切变检测范围,提高风切变的识别精度<sup>[4]</sup>;基于激光雷达逆风廓线风速梯度和GLYGA的综合判别法大大提高了风切变的预

警率,在最优F因子阈值条件下预警率高达87%~90%,对地形诱导风切变和海陆风锋诱发的风切变识别非常有效<sup>[18-19]</sup>。风切变的成因有很多,雷暴等强对流天气引发的风切变对飞行安全威胁较为严重<sup>[20-22]</sup>,晴空天气下地形诱导的风切变出现频率较高。在香港国际机场,地形诱导风切变成为最主要的风切变类型,占飞行员风切变报告的70%<sup>[4]</sup>。围绕地形诱导风切变,现有研究多从激光雷达实测数据<sup>[23-24]</sup>和数值模拟<sup>[25-26]</sup>两方面进行分析,主要探究地形重力波和复杂风场气流<sup>[27]</sup>对风切变的影响。

由于受到来自西伯利亚和贝加尔湖等冷高压的影响,冬季及早春时节北京首都国际机场(以下简称首都机场)风速较大,且主要为西北风。当不稳定的天气系统与首都机场跑道周围地形建筑物相互作用时,跑道风场通常会表现为风速变化大且风向突变,极易诱发低空风切变。首都机场夏季高温多雨,易受雷暴等强对流天气影响产生风切变不同成因类型的风切变探测,中国海洋大学激光雷达课题组于2018年1月至2019年10月在首都机场开展了相关试验。本文对试验期间首都机场干性雷暴和晴空地形诱发的风切变进行了有效识别与告警,并对风切变诱发机制进行分析。

## 1 系统介绍与试验设置

本试验采用中国海洋大学与青岛镭测创芯科技有限公司联合研制的两台Wind3D 6000航空气象型测风激光雷达(如图1所示)进行观测,激光雷达系统由三部分组成:激光发射系统、光学接收系统和信号采集处理系统。激光经由发射系统进入大

表2 传统风切变观测设备工作原理、优势和局限性

Table 2 The principles, advantages and limitations of conventional instruments for wind shear observation

观测设备	工作原理	优势	局限性
地基超声风速计	根据声波脉冲从发射端到达接收端的时间或频率差反演风速和风向。	风速测量精度高、流场破坏小等优点。	1) 超声风速计为点测量,无法获得整个风场的空间分布;2) 只能探测地面高度的水平风切变;3) 无法观测地形诱导下的高时空变化的低空风切变;4) 阵风情况下,不理想的风速计选址和较低数据质量会导致系统误报。
声雷达	通过定向发射声波信号,并根据接收到的散射信号实现大气边界层要素的反演。	灵敏度高、生产成本低;能获得独特的边界层湍流的动力和热力结构。	1) 声雷达为声波探测,声波在大气中衰减很大,探测高度有限。 2) 声雷达探测易受到雨雪、噪声等多种因素影响,因而在降水和大风环境中无法使用。
多普勒天气雷达	通过发射一系列电磁波脉冲,利用云雨、雪等降水粒子对电磁波的散射反演风场结构特征和垂直气流速度。	1) 探测距离较远,可探测几百公里距离范围内的风场。2) 能够探测湿性风切变(雷暴天气、热带气旋等强对流天气诱发的风切变)。	1) 在晴空无云的情况下探测性能低,无法实现晴空(干性)风切变观测,误报率较高。 2) 体积庞大,灵活性差,空间分辨率较低。

气,在大气中与气溶胶等粒子相互作用后携带多普勒频移信息进入光学接收系统,随后与本振光进行拍频。拍频后的信号由平衡探测器接收,并通过信号采集处理系统实现信号转换和径向风速反演<sup>[13][15]</sup>。Wind3D 6000激光雷达系统的主要技术指标如表3所示。



图1 Wind3D 6000 航空气象型测风激光雷达

Fig. 1 Wind3D 6000 scanning wind lidar

表3 Wind3D 6000 航空气象型测风激光雷达技术指标

Table 3 Technical specifications of Wind3D 6000 scanning wind lidar

发射系统参数	
工作波长	1550 nm
脉冲能量	150 $\mu$ J
脉冲宽度	100 ns to 200 ns
脉冲重复频率	10 kHz
接收、采集系统参数	
望远镜直径	75 mm
望远镜有效孔径	60 mm
平衡探测器带宽	250 MHz
平衡探测器共模抑制比	>20 dB
采样率	1 GHz
ADC 分辨率	12 bits
激光雷达测量参数	
探测距离	45 ~ 6000 m
数据更新率	1 ~ 10 Hz
距离分辨率	15 ~ 30 m
风速准确性	$\leq 0.1$ m/s
径向风速测量范围	-37.5 ~ +37.5 m/s*
风向准确度	0.1°

\*注:径向风速的正负号指示风运动的方向,“+”代表风朝远离激光雷达的方向运动,“-”代表风朝靠近激光雷达的方向运动

首都机场共有3条跑道,分别是36L/18R(西跑道)、36R/18L(中跑道)和01/19(东跑道),如图2所

示。根据航空飞行学原理,飞机需逆风起降。因此在冬春季节盛行西北大风时,飞机多在各条跑道的南端降落。由于36L端和01端的西北侧下垫面较为复杂(居民楼、高大树木、航站楼等),高速气流会与复杂下垫面相互作用,增加下滑道风场的不均匀性,极易产生晴空条件下的地形诱导风切变。本次试验共设置2台激光雷达对36端和01端风切变及周围环境风场进行同步观测,如表4所示。

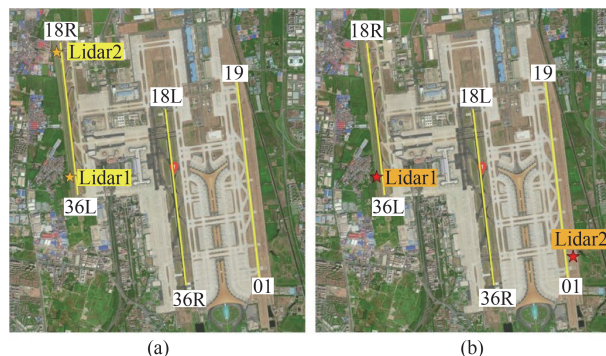


图2 北京首都国际机场周边地理环境及激光雷达位置图 (a) 试验第一阶段:2018.01-2018.10, (b) 试验第二阶段:2018.11-2019.10

Fig. 2 The geographical environment around Beijing Capital International Airport and locations of lidars (a) the first phase of experiment from January 2018 to October 2018, (b) the second phase of experiment from November 2018 to October 2019

表4 不同跑道端两台激光雷达同步观测试验信息

Table 4 Experimental information for synchronous observation of two lidars at different runway corridors

试验阶段	试验时间	试验地点	试验目的
第一阶段	2018.01 - 2018.10	Lidar1:西跑道南 端(36L)	不同天气条件下 西跑道南北两端 风切变观测及风 场研究
		Lidar2:西跑道北 端(18R)	
第二阶段	2018.11 - 2019.10	Lidar1:西跑道南 端(36L)	东西跑道南端地 形诱导风切变观 测及风场研究
		Lidar2:东跑道南 端(01)	

## 2 观测模式与风切变识别方法

### 2.1 观测模式

激光雷达常见的基本观测模式有3种:1)多普勒波束摆动(Doppler Beam Swing, DBS)风廓线模式,该模式通过控制激光雷达扫描转镜实现东、西、

南、北和垂直五个方向的径向风场扫描,多用于三维风场的风廓线反演<sup>[13,28]</sup>;2)平面位置显示器(Plan Position Indicator, PPI)模式是激光雷达固定俯仰角,改变方位角扫描的探测方式,可用于风机尾流<sup>[14,29]</sup>、风切变<sup>[8]</sup>等的观测研究。3)距离高度显示器(Range Height Indicator, RHI)模式是保持激光雷达方位角不变,通过改变俯仰角进行扫描,该模式在飞机尾涡观测中有广泛的应用<sup>[11,30]</sup>。激光雷达扫描方式较为灵活,除了上述三种常用的基本扫描模式外,还可以根据试验需求进行个性化设置,如下滑道风切变模式。该模式通过对下滑道与跑道夹角、激光雷达与跑道中心线及着陆点的相对位置等位置参数进行精确几何计算,得到下滑道不同位置相对于激光雷达的俯仰角和方位角信息。激光雷达可根据系统脚本设定的参数,通过俯仰角和方位角的有序变换,实现下滑道平面的风切变探测。本试验针对风切变的观测需求,在不同的阶段分别采用了DBS风廓线模式和下滑道模式进行观测。DBS风廓线模式有两种适用的天气场景:干性雷暴天气和晴空天气,如图3所示。而对于一般的降雨天气和伴随强降雨的雷暴天气,激光能量会大幅度衰减,DBS风廓线模式的探测距离会受到限制。下滑道模式可以实现下滑道区域风切变的精确识别,如图4所示,能够获取下滑道不同位置快速变化的风速信息,对于地形诱导风切变有独特的探测优势。同时,为满足风切变期间背景风场的观测需求,试验采用多个基本模式有机组合的方式,实现风切变及跑道周围风场的综合观测,试验期间扫描模式如表5所示。

## 2.2 风切变识别方法

### 2.2.1 DBS模式风切变识别方法

根据国际民航组织的标准<sup>[31]</sup>,通常采用每30

表5 试验期间激光雷达风切变观测扫描模式设置

Table 5 Lidar scanning strategy settings of wind shear during the experiments

试验阶段	试验时间	Lidar1和2同步扫描模式	备注
第一阶段	2018.01 - 2018.10	DBS风廓线模式	/
第二阶段	2018.11 - 2019.10	1)下滑道模式 2)PPI模式 3)RHI模式	一个扫描周期包含前述3种模式,共计8 min,下滑道扫描时间约占60%。

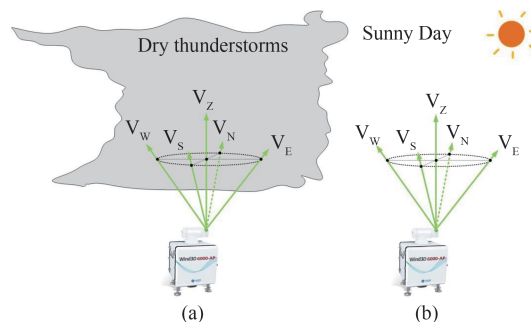


图3 不同天气条件下的激光雷达DBS风廓线模式扫描示意图(a)干性雷暴天气,(b)晴天

Fig. 3 Schematic diagram for DBS wind profile scanning mode of lidar under different weather conditions (a) dry thunderstorms, (b) sunny day

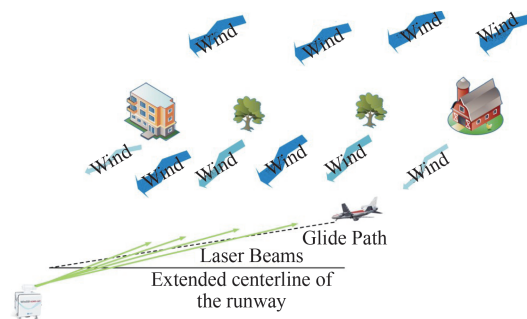


图4 激光雷达下滑道模式风切变观测示意图

Fig. 4 Schematic diagram for glide path scanning mode of lidar

m(100 ft)高度区间内的风速变化值来定义风切变的强度,以此实现垂直风切变的预警。这种定义方式比较方便,且容易被飞行员理解。1967年在蒙特利尔召开的第五届航空会议对垂直方向每30 m高度范围内的风切变强度等级进行如下划分:0~4 kt(轻度风切变);5~8 kt(中度风切变);9~12 kt(重型风切变);>12 kt(严重风切变)。

荷兰国家航空航天局(Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium, NLR)就机场附近障碍物(建筑物、树木等)对飞行安全的影响开展了相关研究,提出了“7 kts准则”。该准则最初主要研究障碍物影响下横风(垂直于飞机航行方向)对飞行安全的影响,没有考虑到逆风(沿飞机航行方向)、障碍物几何形状、阵风和大气湍流等多种因素的影响<sup>[32]</sup>。针对上述局限性,NLR开展了大量实验对该准则进行优化,以适应更加复杂大气条件下的水平风切变识别。

DBS模式风切变识别法首先利用DBS风场反演方法获得风速风向廓线信息,然后根据合适的

预警准则识别风切变。考虑到首都机场飞机通常是按照下滑轨迹降落,而非垂直起降,需要相邻时间和相邻高度范围内的风速变化信息;此外,飞机在进近阶段容易受到首都机场内及其周边障碍物(航站楼、居民楼、高大树木)的影响。综合上述因素,本文采用“7 kts 准则”进行首都机场水平风切变的识别与定位。该方法首先确定背景风速大于 12 m/s 的高度值,然后计算不同时刻相同高度或相邻高度上速度变化量。如果速度变化量大于等于 7 kt(约 3.6 m/s)就标记为风切变,风切变识别流程如图 5(a)所示,识别出的风切变位置如图 5(b)所示。

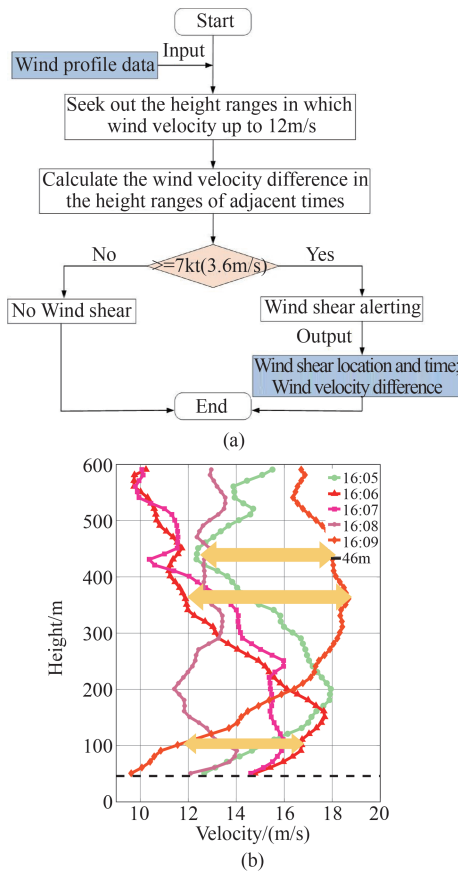


图5 DBS 模式风切变识别法(a)风切变识别流程图,(b)识别出的风切变高度

Fig. 5 Wind shear identification of DBS method (a) flow chart of wind shear identification, (b) the wind shear heights

2.2.2 下滑道模式风切变识别方法

下滑道模式风切变识别法多用于判断飞机在某一特定方向上的风切变(如沿下滑道方向上风矢量的改变),能够有效地识别飞机降落过程中遭遇的低空风切变。该方法的判断准则<sup>[4]</sup>如下:3 nm 距

离内,若逆风廓线增大或减小值超过 15 kt,则判定为风切变;该方法还可进行风切变强度值的计算,如式(1)所示,并根据风切变强度值  $I$  的立方根划分风切变强度等级,当该值在  $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-2/3}$  范围时,为中等强度风切变;当该值大于  $0.5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-2/3}$  时,为严重风切变。

$$I = \left( \frac{dV}{dt} \right) \left( \frac{\Delta V}{V_{app}} \right)^2 = \frac{1}{V_{app}} \left| \frac{\Delta V}{R^{1/3}} \right|^3 \quad (1)$$

式(1)中  $\frac{\Delta V}{R^{1/3}}$  是风速在下滑道上的变化率,  $\Delta V$  是一段距离内风速的总变化值,  $V_{app}$  是飞机的平均进近速度,一般取 75 m/s。  $R$  是飞行轨迹上的风切变长度。

在实际应用中需要综合考虑预警阈值和风切变强度值进行判断和识别。当逆风廓线变化超过预警阈值时,若此时风切变强度值很小,这意味着产生风切变的距离过长,飞机飞经风切变区域的时间长,飞行员有足够的时间调整飞机姿态以安全通过危险区域,该情况下风切变可能不会对飞行安全产生较大影响。

本次试验中激光雷达与跑道边缘线距离约 70 m,激光光束与下滑道最大夹角小于  $30^\circ$ ,以减小侧风分量的影响。在获得径向风速后,需首先确定激光光束与下滑道的交点,然后提取交点处的径向风速重构逆风廓线。对逆风廓线进行遍历检测,根据 15 kt 预警准则识别风切变,其流程如图 6 所示。

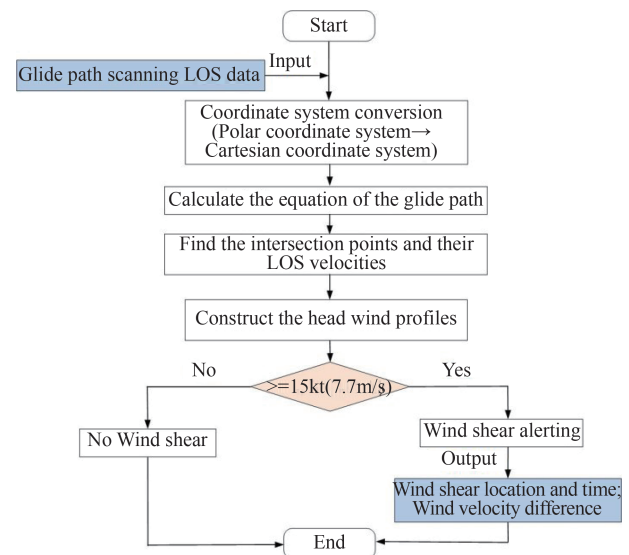


图6 下滑道风切变识别流程图

Fig. 6 Flow chart of wind shear identification by glide path method

### 3 两类风切变的观测与识别

#### 3.1 干性雷暴天气下的风切变观测与分析

##### 3.1.1 背景风场分析

2018年6月29日8时高空500 hPa天气图(图7)显示,槽脊发展旺盛,北京地区上空为明显的槽后西北干冷气流,700 hPa转为北风,850 hPa又转为西北风,地转风温度平流为上冷下暖结构,大气层结趋于不稳定,850 hPa以下为西南暖湿气流,为北京地区形成明显的不稳定层结提供了热力和动力条件,易产生强对流天气活动。

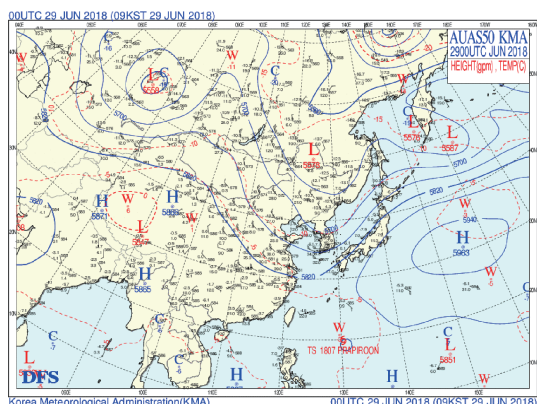


图7 2018年6月29日高空500 hPa天气图

Fig. 7 500 hPa synoptic chart on June 29, 2018

6月29日航空例行天气报告(Meteorological Terminal Aviation Routine Weather Report, METAR)北京(机场)气象资料(表6)显示,上午10:30开始首都机场上空存在垂直发展较为旺盛的浓积云,下午15:30-17:00时段有轻度雷暴发生。10 m高度处风速从下午15:00开始出现9 m/s阵风,平均风速在雷暴期间骤增,由4 m/s增至11 m/s,风向由雷暴前的偏南风转为偏北风,至雷暴结束时刻又恢复至偏南风。到傍晚18:30-19:00积雨云散去,风速恢复至3 m/s。

雷暴期间激光雷达所测风速风向随高度和时间变化信息如图8所示。一般而言,降水会使激光光束的能量衰减,导致测量距离大幅度缩短。此次天气活动为干性雷暴,没有强降雨出现,图中激光雷达的观测距离也没有降低。从图8(a)中分析可知,此次干性雷暴发生前14:40-15:00风速低于5 m/s,至15:05时500 m以下所有高度同时出现风速骤增,风向从南风急转至北风,如图8(b)所示,风场在该时段内出现较大风速切变和风向切变。到16:40干性雷暴逐渐减弱,风向恢复至南风,与首都机场METAR数据呈现出一致的变化趋势。垂直速度时间高度分布图显示上

表6 2018年6月29日北京首都国际机场(ZBAA)METAR气象数据

Table 6 METAR data of Beijing Capital International Airport (ZBAA) on June 29, 2018

当地时间	风速 (m/s)	风向	阵风 (m/s)	云量	特殊天气现象
10:00	1	风向多变		无明显的云	
10:30	1	风向多变	6	少云(10%~30%) 1500 m, 垂直发展很旺盛的浓积云	
11:00	3	东南偏东风		无明显的云	
11:30	3	南风		无明显的云	
12:00	4	东南偏东风		少云(10%~30%) 1500 m, 垂直发展很旺盛的浓积云	
12:30	4	东南偏南风		少云(10%~30%) 1500 m, 垂直发展很旺盛的浓积云	
13:00	5	东南偏南风		少云(10%~30%) 1500 m, 垂直发展很旺盛的浓积云	
13:30	4	东南偏南风		少云(10%~30%) 1500 m, 积雨云	
14:00	5	南风		少云(10%~30%) 1500 m, 积雨云	
14:30	4	西南风		疏云(40%~50%) 1500 m, 积雨云	
15:00	4	西南偏南风	9	少云(10%~30%) 600 m, 疏云(40%~50%) 990 m, 积雨云	
15:30	11	西北偏北风	16	多云(60%~90%) 990 m, 积雨云	雷暴
16:00	11	西北偏北风		多云(60%~90%) 990 m, 积雨云	轻度(小)(弱)雷暴
16:30	9	东北偏北风		疏云(40%~50%) 990 m, 积雨云	轻度(小)(弱)雷暴
17:00	3	东北偏北风		疏云(40%~50%) 990 m, 积雨云	雷暴
17:30	9	西南偏南风		疏云(40%~50%) 990 m, 积雨云	
18:00	8	西南偏南风		少云(10%~30%) 990 m, 积雨云	
18:30	6	南风		无明显的云	
19:00	3	东南偏东风		无明显的云	

午10时左右空气对流在低空逐渐形成,慢慢发展,高度开始升高,强度增强,至下午干性雷暴发生前后形成强对流,如图9所示。

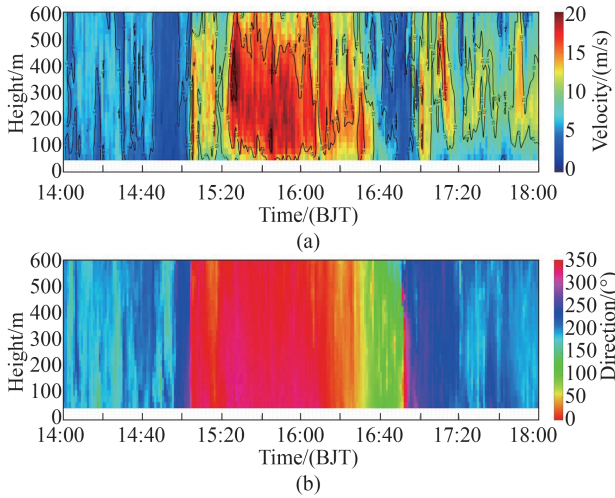


图8 2018年6月29日干性雷暴期间激光雷达风速风向图(1min平均)(a)风速梯度图,(b)风向图

Fig. 8 Wind velocity and direction measured by lidar during dry thunderstorms on June 29, 2018 (a) wind velocity gradient, (b) wind direction

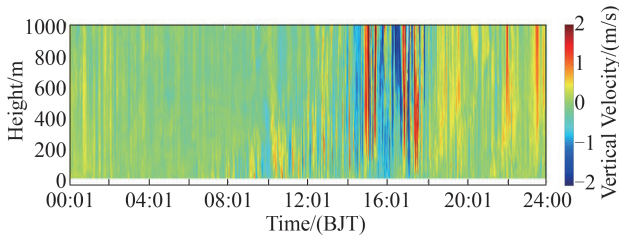


图9 激光雷达垂直速度THI(时间高度强度)分布图  
Fig. 9 THI (Time Height Intensity) of vertical wind velocity measured by lidar

干性雷暴期间36L端和18R端在100 m、300 m高度风速时间序列如图10所示,干性雷暴时段用黄色矩形区域表示。由图可知,西跑道36L端和18R端风速在干性雷暴期间呈现出一致的变化趋势,同时也存在因风场不均匀性导致的局部差异。风场的非均一性有两方面原因:跑道两端下垫面非均匀;干性雷暴水平结构复杂。图10(a)和(b)显示在100 m和300 m高度36L端和18R端风速稳定在5 m/s左右,且两端风速差异较小。至下午15:00风速开始升高,约50 min后风速增加至约16 m/s,两端风速的差异也增大,36L端风速大于18R端。15:50以后风速开始呈现下降趋势,至17:00风速恢复到原来的风速水平。

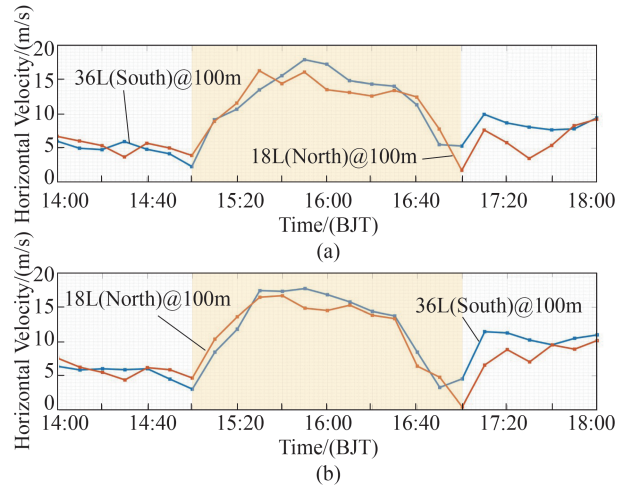


图10 36L和18R端激光雷达不同高度处风速时间序列图(a)100 m,(b)300 m

Fig. 10 Lidar wind velocity time series at different heights (above ground level) at 36L and 18R corridor (a) 100 m, (b) 300 m

### 3.1.2 风切变观测与识别

干性雷暴期间风速骤增和风向突变,并伴随有强烈的上升下降气流,这些不稳定条件都会造成飞机升力的改变,极易引发风切变。由3.1.1节背景风场分析可知,15:00-15:30期间干性雷暴逐渐发展成熟,背景风速逐渐升高至10 m/s以上,15:30-16:30风速稳定在高风速水平,至16:30-17:00逐渐减弱消散。利用DBS模式风切变识别法对上述过程进行风切变识别与分析,用黄色双向箭头标记风切变位置,如图11所示,干性雷暴期间在多个高度、多个时段存在水平风切变。

图11(a-b)所示时段处于干性雷暴发展阶段,此时风速开始增大,由8~10 m/s升高至14~16 m/s,到图11(c-d)所示的成熟阶段,风速已经稳定在12~18 m/s范围内,在这两个阶段风切变主要分布在100~500 m高度区间。发展阶段的风切变速度变化幅度相对较小,变化范围在3.6~4 m/s。而当干性雷暴继续发展到成熟阶段,风切变强度增强,风速差高达4~6 m/s,期间在100~200 m高度范围内伴随有低空急流出现。图11(e-h)所示时段处于干性雷暴从成熟到消散的过渡阶段,从图中可知,该阶段背景风场开始呈现衰减趋势,且风速变化较发展、成熟阶段缓和,该阶段风切变发生数量较前两个阶段少,风速变化幅度在3.6~4 m/s,高度范围较前两个阶段略有缩小,主要分布在200~400 m高度范围。风切变的发生时段、高度和风速差等信息如表7所示。



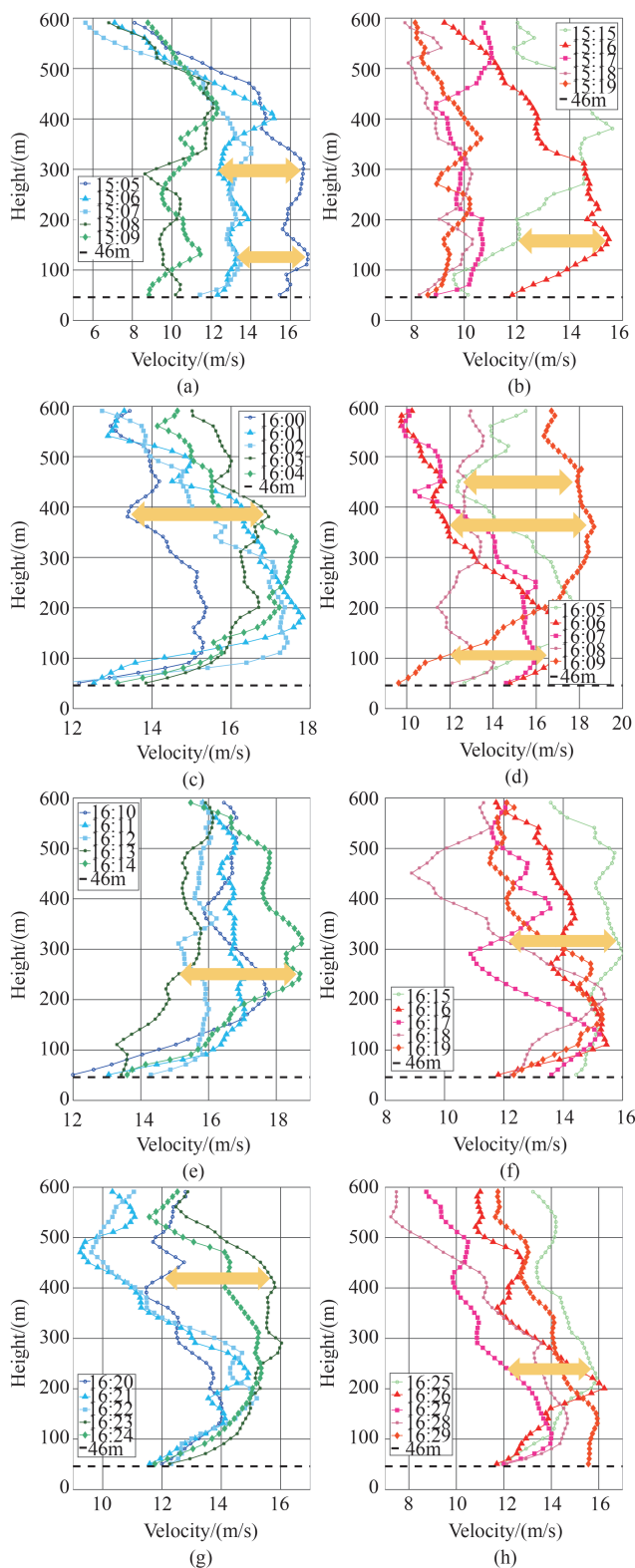


图 11 干性雷暴期间不同时刻激光雷达风切变识别 (a) 15:05-15:10, (b) 15:15-15:20, (c) 16:00-16:05, (d) 16:05-16:10, (e) 16:10-16:15, (f) 16:15-16:20, (g) 16:20-16:25, (h) 16:25-16:30

Fig. 11 Wind shear alerting of lidar at different time during dry thunderstorms (a) 15:05-15:10, (b) 15:15-15:20, (c) 16:00-16:05, (d) 16:05-16:10, (e) 16:10-16:15, (f) 16:15-16:20, (g) 16:20-16:25, (h) 16:25-16:30

## 3.2 地形诱导风切变观测与分析

### 3.2.1 背景风场分析

2019年5月19日8时,高空500 hPa天气图(图12)显示,河套地区有一槽,槽前西南气流旺盛,槽前疏散且有暖平流,槽易迅速发展。图13显示低压中心位于河北省北部,锋面过境,锋前降水明显。

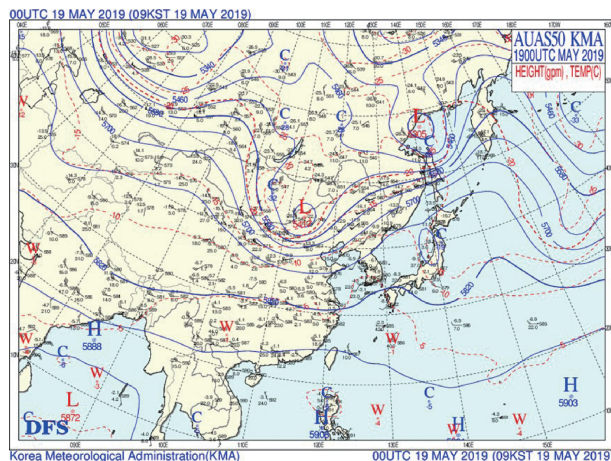


图 12 2019年5月19日高空500 hPa天气图

Fig. 12 500 hPa synoptic chart on May 19, 2019

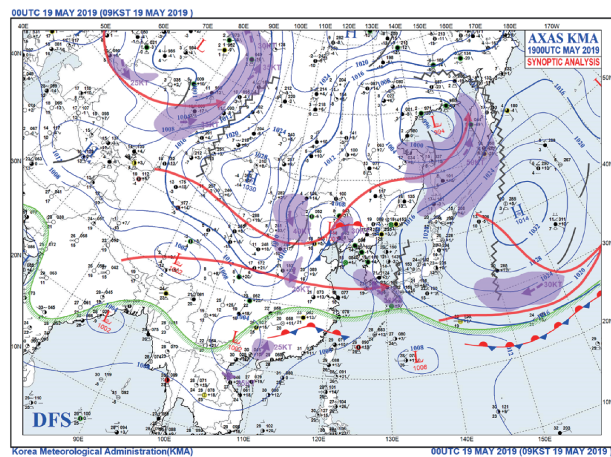


图 13 2019年5月19日高空-地面天气分析图

Fig. 13 High altitude-surface synoptic analysis chart on May 19, 2019

受冷锋过境影响,首都机场 METAR 数据显示凌晨2点至早晨6点首都机场存在雷暴天气。雷达反射率天气分析图(图14)显示凌晨2点北京附近存在较高的反射率,说明该区域有较强降水。至下午13:30-19:00首都机场出现西北大风,如表8所示,背景风速维持在13 m/s及以上。期间激光雷达通过执行PPI模式利用VAD方法反演得到的背景风场如图15所示,图中也呈现了冷锋活动期间伴随的雷雨和大风现象。由于降雨的存在,激光能量在大气中

表7 干性雷暴期间风切变信息一览表

Table 7 The information of wind shear during the dry thunderstorms

风切变发生时段	风切变发生高度/m	最小风速/(m/s)	最大风速/(m/s)	风速差/(m/s)
15:05 ~ 15:06	120	13.4	17.1	3.7
	300	12.4	16.6	4.2
15:15 ~ 15:16	153	12.1	15.7	3.6
16:00 ~ 16:03	378	13.3	16.9	3.6
16:05 ~ 16:09	453	12.3	18.1	5.8
16:06 ~ 16:09	113	12.1	16.8	4.7
	360	12	18.6	6.6
16:13 ~ 16:14	246	15.1	18.7	3.6
16:15 ~ 16:18	310	12.2	15.8	3.6
16:20 ~ 16:23	420	12	15.7	3.7
16:25 ~ 16:27	238	12.1	15.9	3.8

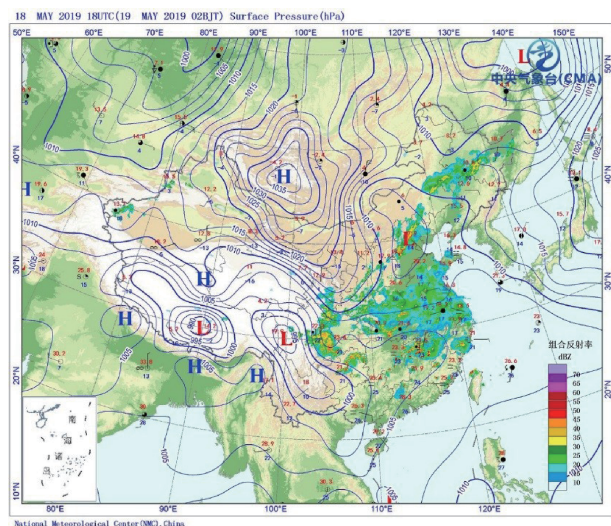


图14 2019年5月19日雷达地面天气图

Fig. 14 Radar surface synoptic chart on May 19, 2019

快速衰减,激光雷达的探测距离受到限制,图中从凌晨2点至上午9点左右探测高度大幅降低,期间风速较小,维持在5 m/s左右。至下午13时风速开始增大,最大风速约25 m/s,高风速一直维持到晚间19时,高风速期间风向较为稳定,以西北风为主,与METAR数据的风速风向整体趋势相吻合。

### 3.2.2 地形诱导风切变观测与分析

地形诱导风切变通常由高大山脉、机场周围障碍物(建筑物、树木等)引起,具有偶发性和瞬变性<sup>[4]</sup>等特点,给风切变的探测和预警带来一定的困难。当大尺度天气系统过境首都机场时,高空运动系统驱动地面产生较强的西北气流,高速气流与复杂下垫面相互作用,便诱发了低空风切变,如图16-19所示。图16为36L跑道端径向风速图和逆风廓线图,由于来自西北方向的高速气流与36L跑道端西北方向居民楼等建筑物、高大树木和小土丘相互作用,

表8 13:30 - 19:00(2019年5月19日)北京首都国际机场METAR气象数据

Table 8 METAR data of Beijing Capital International Airport (ZBAA) form 13:30 to 19:00 on May 19, 2019

时间	风向	风速/(m/s)	机场当前特殊天气现象	总云量
13:30	从西方吹来的风	14		无明显的云
14:00	从西方吹来的风	16		无明显的云
14:30	从西北偏西方向吹来的风	15		无明显的云
15:00	从西方吹来的风	16		无明显的云
15:30	从西方吹来的风	16		无明显的云
16:00	从西方吹来的风	14		无明显的云
16:30	从西北偏西方向吹来的风	14		无明显的云
17:00	从西北方吹来的风	14		无明显的云
17:30	从西北方吹来的风	14		无明显的云
18:00	从西方吹来的风	13		无明显的云
18:30	从西北偏西方向吹来的风	13		无明显的云
19:00	从西北偏西方向吹来的风	13		无明显的云

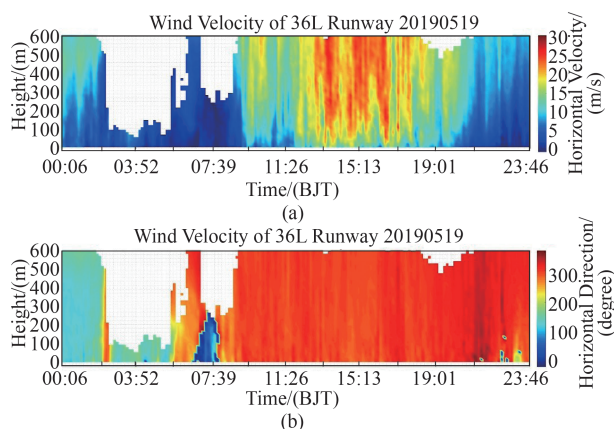


图 15 2019 年 5 月 19 日激光雷达背景风场图 (a) 风速, (b) 风向

Fig. 15 Background wind field measured by lidar on May 19, 2019 (a) wind velocity, (b) wind direction

在跑道上产生尾流效应,在径向风速图中表现为高低风速条带,如图 16(a)所示。该尾流效应导致下滑道逆风廓线出现较大风速起伏,如图 16(b)所示。飞机着陆时,在距离约 1 879 m 处逆风风速约为 5.3 m/s,当飞至距着陆点约 1 527 m 时,逆风风速增加至 17.7 m/s,风速差高达 12.4 m/s,远超警报阈值 7.7 m/s (15 kt),风切变强度高达  $0.42 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-2/3}$ ,如表 9 所示,造成飞机的严重颠簸,出现逆风风切变,引发激光雷达警报。图 17 为此次风切变期间激光雷达径向风速组图,从图中可明显观察到由于受到地形尾流效应影响,下滑道区域产生快速变化的风速条带,表现出瞬变性的特点。

同样的情形出现在 01 跑道,如图 18 所示,由于西北侧 T3 航站楼的影响,径向风速图中出现明显的高低风速条带,下滑道逆风廓线起伏较大,飞机着陆时,在距离约 920 m 处逆风风速约为 18.4 m/s,当飞至距着陆点约 427 m 时,逆风风速减小至 6.8 m/s,风速差高达 11.6 m/s,远超警报阈值 7.7 m/s (15 kt),风切变强度达  $0.35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-2/3}$ ,如表 9 所示,激光雷达发出顺风风切变警报。图 19 为此次风切变期间激光雷达径向风速组图,由图可知高速背景气流与航站楼相互作用,加剧了下滑道逆风廓线的起伏程度。随着风

表 9 地形诱导风切变信息一览表 (2019.05.19)

Table 9 The information of terrain-induced wind shear (2019.05.19)

风切变发生时间	风切变发生跑道	风切变发生高度区间/m	风切变距离着陆点位置/m	最大风速/(m/s)	最小风速/(m/s)	风速差/(m/s)	风切变强度/ $(\text{m}^{1/3} \text{ s}^{-2/3})$
17:08	36L	80 ~ 98	1527 ~ 1879	17.7	5.3	12.4	0.42
17:07	01	22 ~ 48	427~920	18.4	6.8	11.6	0.35

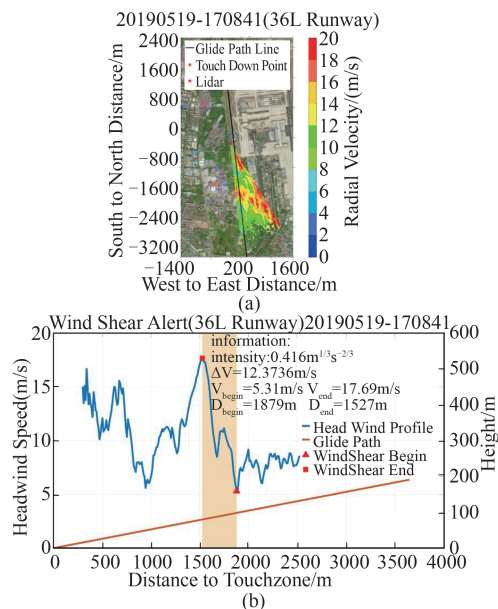


图 16 2019 年 5 月 19 日 36L 跑道端激光雷达风切变信息 (a) 径向风速图, (b) 下滑道逆风廓线图

Fig. 16 Wind shear alerting information of lidar at 36L runway corridor on May 19, 2019 (a) radial velocity, (b) headwind profile retrieved from the glide path scanning mode

速和风向的快速变化,风速条带方向和影响区域也随之改变。

## 4 结论

本文利用两台相干多普勒测风激光雷达在北京首都国际机场开展了风切变观测试验,对干性雷暴和晴空地形诱发的风切变进行了有效识别与告警,并结合背景风场特征深入分析了两种风切变的发生机制,主要工作和结论如下:

1) 不同成因类型的风切变研究需要采用不同的观测模式、反演方法和预警准则。干性雷暴具有复杂的水平和垂直空间结构,文中采用 DBS 风廓线模式探测并分析了首都机场一次干性雷暴活动,并对干性雷暴期间的水平风场和垂直气流特征进行分析。考虑到飞机的降落轨迹和机场周围障碍物影响,文中采用 DBS 模式风切变识别方法,根据“7 kts 准则”识别干性雷暴引发的风切变。

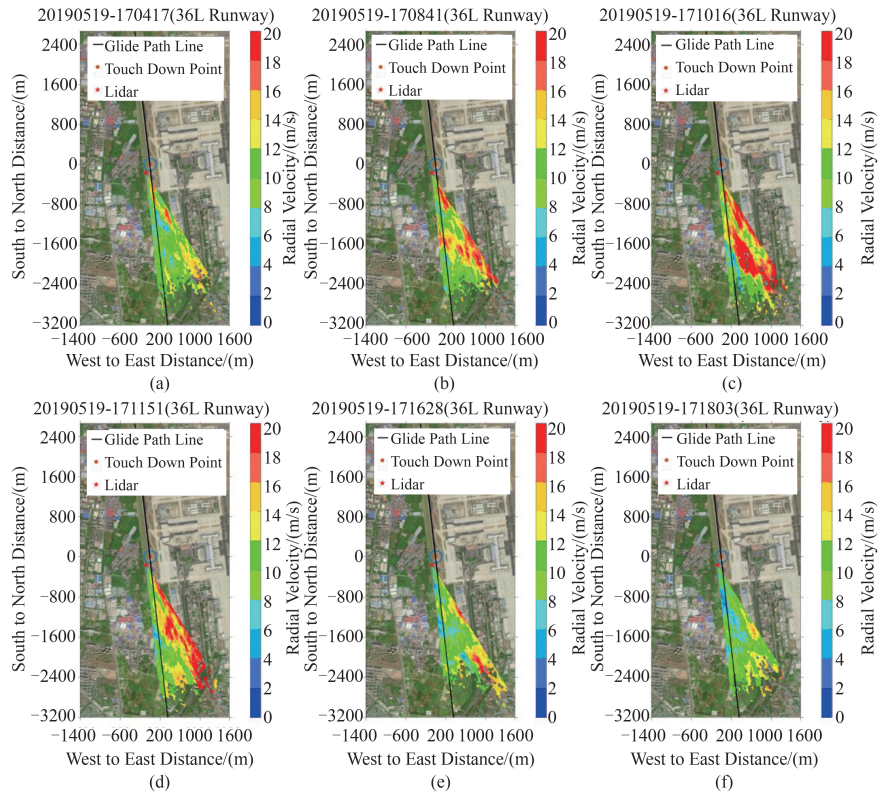


图 17 2019年5月19日风切变期间36L跑道端不同时刻激光雷达径向风速图 (a) 17:04:17, (b)17:08:41, (c)17:10:16, (d) 17:11:51, (e)17:16:28, (f)17:18:03

Fig. 17 Radial wind velocity measured by lidar at 36L runway corridor on May 19, 2019 (a) 17:04:17, (b)17:08:41, (c)17:10:16, (d)17:11:51, (e)17:16:28, (f)17:18:03

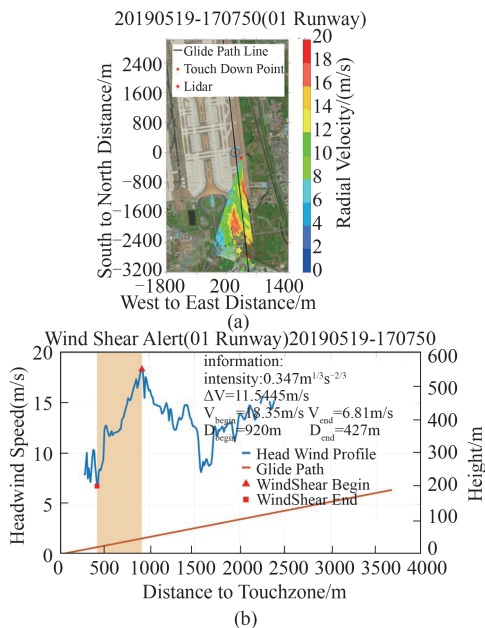


图 18 2019年5月19日01跑道端激光雷达风切变信息 (a) 径向风速图, (b)下滑道逆风廓线图

Fig. 18 Wind shear alerting information of lidar at 01 runway corridor on May 19, 2019 (a) radial velocity, (b) head wind profile retrieved from the glide path scanning mode

2)与干性雷暴诱发的风切变不同,地形诱导风切变具有偶发性和瞬变等特点。针对此类风切变,试验中采用下滑道风切变模式进行观测,通过判断3 nm以内逆风廓线变化值是否达到警报阈值7.7 m/s(约15 kt)进行风切变的识别。

3)干性雷暴引发的风切变分析结果表明,干性雷暴期间高速变化的水平风场和强烈的对流是引发风切变的主要因素。在干性雷暴发展和成熟阶段,低空风切变出现的范围较大,在100~500 m的多个高度均有分布,其中成熟阶段风切变强度比发展阶段明显增强,1 min内风速差甚至高达4~6 m/s(约8~12 kt),期间伴随有低空急流出现。从成熟到消散的过渡阶段,风速变化缓和,风切变发生的高度范围也有所减小。

4)地形引起的风切变分析结果表明,冷锋(大型天气系统)过境北京首都国际机场时,高空大气运动会驱动地面产生较强的西北气流,地表高速气流与跑道端(36L端和01端)西侧和西北侧的复杂下垫面(建筑物、高大树木和土丘)产生相互作用,在下滑道区域产生地形尾流。尾流效应增加了下滑

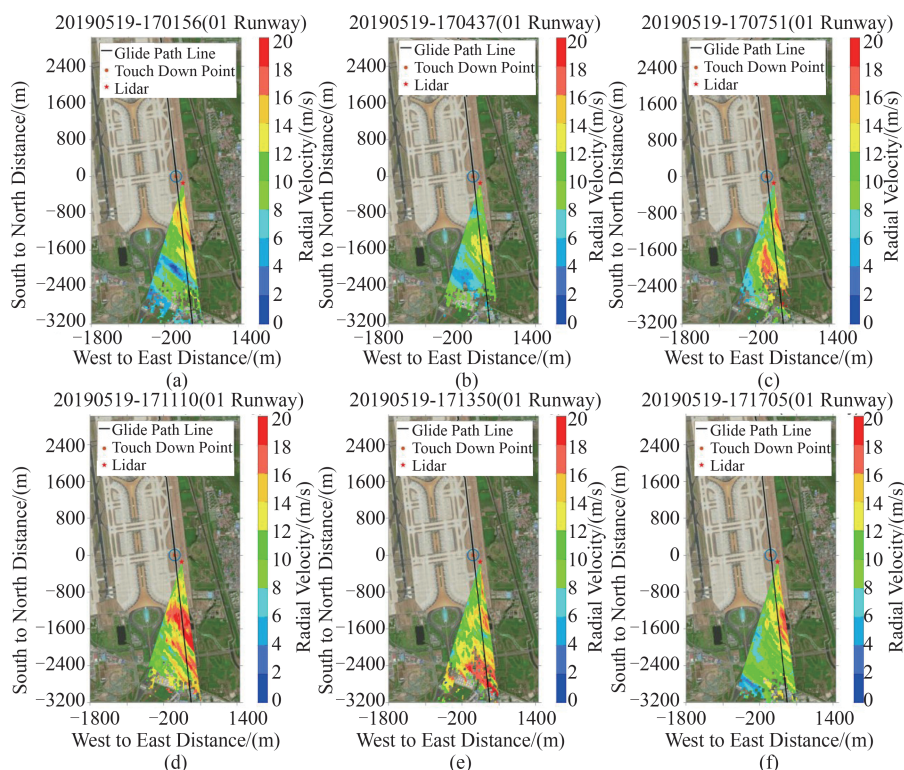


图 19 2019年5月19日风切变期间01跑道端不同时刻激光雷达径向风图 (a) 17:01:56, (b) 17:04:37, (c) 17:07:50, (d) 17:11:10, (e) 17:13:50, (f) 17:17:05

Fig. 19 Radial wind velocity measured by lidar at 01 runway corridor on May 19, 2019 (a) 17:01:56, (b) 17:04:37, (c) 17:07:50, (d) 17:11:10, (e) 17:13:50, (f) 17:17:05

道逆风廓线的起伏和飞机的颠簸程度。若此时逆风廓线变化超过警报阈值,便会出现逆风(或顺风)风切变。地形引起的风切变出现频次高,而且具有很高的时空偶发和瞬变特性,因此在晴空大风条件下需加强对此类风切变的预警观测。

#### 致谢:

感谢中国民用航空华北地区空中交通管理局对本试验的项目支持,感谢青岛镭测创芯科技有限公司的王希涛、戚一麟、张立辉、尹嘉萍、范梦奇在现场观测试验和数据处理分析中提供的帮助。感谢中国海洋大学激光雷达课题组的戴光耀、翟晓春、李珍妮在问题讨论过程中提出的建议。感谢中国民用航空华北地区空中交通管理局的张曦、丁媛媛在数据整理与获取中提供的支持与帮助。

#### References

[1] ZHANG Cheng-Chang. *Flight Meteorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press (章澄昌. 飞行气象学. 北京: 气象出版社), 2000.  
 [2] WANG Xiu-Chun, GU Ying, LI Cheng. *Aviation meteorology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (王秀春, 顾莹, 李程. 航空气象. 北京: 清华大学出版社), 2014.  
 [3] YU Lan. The study on identification of wind shear based on

image multiscale analysis [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China (于岚. 基于图像多尺度分析的低空风切变识别研究. 天津: 中国民航大学), 2015.

- [4] Shun C M, Chan P W. Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, **25**(5): 637-655.  
 [5] YAN Yan. Low-level wind shear alerting algorithm research of the direct detection LiDAR [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China (闫妍. 直接探测激光雷达的低空风切变预警算法研究. 天津: 中国民航大学), 2016.  
 [6] WANG Qing-Mei, GUO Li-Le. Development of lidar in detection of low altitude wind shear [J]. *LASER and INFRARED* (王青梅, 郭利乐. 激光雷达在机场低空风切变探测中的应用. 激光与红外), 2012, **42**(12): 1324 - 1328.  
 [7] Fujita T T, Caracena F. An analysis of three weather-related aircraft accidents [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1977, **58**(11): 1164 - 1181.  
 [8] ZHANG Hong-Wei, WU Song-Hua, YIN Jia-Ping, et al. Airport low-level wind shear observation based on short-range CDL [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张洪玮, 吴松华, 尹嘉萍, 等. 基于短距相干测风激光雷达的机场低空风切变观测. 红外与毫米波学报), 2018, **37**(04): 468 - 476.  
 [9] HAN Yong-An. The alerting algorithm research of turbulence based on Coherent Doppler Lidar [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China (韩永安. 基于相干测风激光雷达的湍流预警算法研究. 天津: 中国民航大学), 2017.  
 [10] Zhang H, Wu S, Wang Q, et al. Airport low-level wind

- shear lidar observation at Beijing Capital International Airport[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **96**: 113–122.
- [11] Wu S, Zhai X, Liu B. Aircraft wake vortex and turbulence measurement under near-ground effect using coherent Doppler lidar[J]. *Optics Express, Optical Society of America*, 2019, **27**(2): 1142.
- [12] Zhai X, Wu S, Liu B, *et al.* Shipborne wind measurement and motion-induced error correction of a coherent Doppler lidar over the Yellow Sea in 2014 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(3): 1313–1331.
- [13] YIN Jia-Ping. Research and observation of turbine wake and wind field of MABL by Coherent Doppler Wind Lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China (尹嘉萍. 风机尾流场与海气边界层风场的多普勒激光雷达观测研究. 青岛: 中国海洋大学), 2015.
- [14] Zhai X, Wu S, Liu B. Doppler lidar investigation of wind turbine wake characteristics and atmospheric turbulence under different surface roughness[J]. *Optics Express, Optical Society of America*, 2017, **25**(12): A515.
- [15] Wu S, Liu B, Liu J, *et al.* Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar[J]. *Optics Express, Optical Society of America*, 2016, **24**(10): A762.
- [16] Shun C M, Lau S Y. Implementation of a Doppler light detection and ranging ( LIDAR ) system for the Hong Kong International Airport [C]//10 th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology of the American Meteorological Society (AMS). 2002(13–16 May).
- [17] Choy B L, Lee O S M, Shun C M, *et al.* Prototype automatic LIDAR-based wind shear detection algorithms [C]//10th Conf. on Aviation Range & Aerospace Meteorology. 2004.
- [18] Chan P W, Hon K K, Shin D K. Combined use of headwind ramps and gradients based on LIDAR data in the alerting of low-level windshear/turbulence [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2011, **20**(6): 661–670.
- [19] Chan P W. Application of LIDAR-based F-factor in wind-shear alerting [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, **21**(2): 193–204.
- [20] Byrd G P, Proctor F H, Bowles R L. Evaluation of a technique to quantify microburst windshear hazard potential to aircraft [C]//29th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 1990, **2**: 689–694.
- [21] Vicroy D D. Microburst vertical wind estimation from horizontal wind measurements [R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 1994.
- [22] Hinton A D. Airborne derivation of microburst alerts from ground-based Terminal Doppler Weather Radar information: A flight evaluation [R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 1993.
- [23] Shun C M, Cheng C M, Lee O. LIDAR observations of terrain-induced flow and its application in airport wind shear monitoring [C]//International Conference on Alpine Meteorology (ICAM) and Mesoscale Alpine Programme (MAP) Meeting, . Brig, Switzerland: 2003: 19–23.
- [24] Chan P W. An event of tail strike of an aircraft due to terrain-induced wind shear at the Hong Kong International Airport [J]. *Meteorological Applications*, 2012, **19**(3): 325–333.
- [25] Szeto K, Chan P W. High resolution numerical modelling of windshear episodes at the Hong Kong International Airport [C]//12 th Conference on Aviation, Range, & Aerospace Meteorology, American Meteorological Society. Atlanta, GA, USA: 2006.
- [26] Chan P W, Hon K K. Observation and numerical simulation of terrain-induced windshear at the Hong Kong International Airport in a planetary boundary layer without temperature inversions[J]. *Advances in Meteorology*, 2016: 1–9.
- [27] Chan P W, Shao A M. Depiction of complex airflow near Hong Kong International Airport using a Doppler LIDAR with a two-dimensional wind retrieval technique[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2007, **16**(5): 491–504.
- [28] Strauch R G, Merritt D A, Moran K P, *et al.* The Colorado wind-profiling network [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1984, **1**(1): 37–49.
- [29] Barthelmie R J, Pryor S C. Automated wind turbine wake characterization in complex terrain [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**(6): 3463–3484.
- [30] Smalikho I, Köpp F, Rahm S, *et al.* Measurement of atmospheric turbulence by 2- $\mu\text{m}$  Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, **22**(11): 1733–1747.
- [31] ICAO. Manual on low-level wind shear [R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2005.
- [32] Nieuwpoort A M H, Gooden J H M, De prins J L. Wind criteria due to obstacles at and around airports [R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR, 2010.