

文章编号: 1001-4322(2012)09-2037-06

# 多普勒测风激光雷达风场探测结果分析\*

唐 磊<sup>1,3</sup>, 董吉辉<sup>2</sup>, 吴海滨<sup>3</sup>

(1. 合肥师范学院 物理与电子工程系, 合肥 230031;

2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031;

3. 安徽大学 物理与材料科学学院, 合肥 230031)

**摘 要:** 为了验证自行研制的瑞利散射测风激光雷达的性能及应用价值,将激光雷达测量的风速风向廓线与探空气球测量结果进行对比,结果吻合得较好,高度 10 km 以下风速最大差距 3.0 m/s,20 km 以下最大差距 4.5 m/s;风向除拐点外标准差最大 32°。连续探测结果显示了强劲的西风急流和风向转换特征,急流中心的高度一般在 10~12 km,中心最大风速接近 70 m/s,最小风速不低于 30 m/s,20 km 左右拐点最小风速不足 1 m/s,20 km 以上风速逐渐增加;在 20 km 以下风向为西风,在 270°左右变化,20 km 以上为东风,在 90°左右变化。探测结果表明瑞利散射测风激光雷达既能跟踪大尺度季节性气候特征的变化规律,又能突出小尺度瞬态气候特征的形成、演化过程。

**关键词:** 激光雷达; 瑞利散射; 风场; 气候特征

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20122409.2037

基于法布里-珀罗标准具的双边缘瑞利信号检测技术目前已成为国际上中高层大气风场测量普遍采用的手段<sup>[1-5]</sup>。瞄准国际上最先进的技术手段和技术指标,为了解决我国中高层大气风场探测手段欠缺的问题,2009 年底国内首台利用法布里-珀罗标准具检测的瑞利散射测风激光雷达系统样机在合肥研制成功<sup>[6]</sup>。系统设计采用高速度灵敏度的非相干频率检测——强度信号的速度检测方案,对 10~40 km 对流层顶和平流层大气风场进行观测,40 km 高度探测精度 6 m/s。系统研制成功后随即进行了一系列的对比实验与平流层风场观测实验,初步积累了部分平流层风场观测数据。本文详细分析了瑞利散射激光雷达与探空气球所做的对比实验及平流层风场观测实验数据,为进一步优化系统结构做准备;同时总结了实验所在地区实验期间的气候变化规律,并研究了气候特征。

## 1 对比实验与结果分析

2010 年 4 月 27 日在河北廊坊对瑞利散射测风激光雷达与探空气球进行了一次对比实验。探空气球利用无线电探空测风仪每秒记录一次数据,平均上升速度 5.2 m/s,探空气球放飞点距激光雷达 500 m,探测范围 0~9 km。激光雷达每个方向累积激光脉冲 17 400 发,径向距离分辨力 210 m,扫描天顶角 30°,时间分辨力为每廓线 10 min。对比结果如图 1 所示,可以看出风速和风向在可比较的范围内变化趋势吻合得非常好,6 km 处

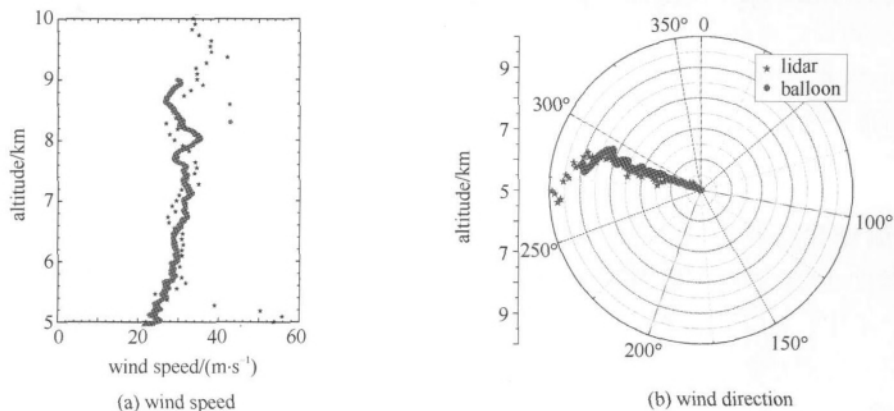


Fig. 1 Profiles of wind speed and direction measured by Rayleigh lidar system compared with data from pilot balloon on April 27, 2010

图 1 2010 年 4 月 27 日激光雷达与探空气球数据对比

\* 收稿日期:2011-08-11 修订日期:2012-03-03

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:唐 磊(1972—),男,博士,主要从事激光遥感信息控制与处理方面研究;tanglei\_66@163.com。

风速相差 0.1 m/s, 7 km 处风速相差 1.8 m/s, 8 km 处风速相差 2.7 m/s, 9 km 处风速相差 3.7 m/s; 风向平均差距小于  $10^\circ$ 。风速在 5.5 km 以下和探空气球之间的差距可能是由于探测器在低对流层过强的气溶胶饱和和信号导致的残余效应所致。

平流层风场探测手段匮乏, 目前获得平流层风场的唯一手段就是释放探空气球。2010 年 8 月 13 日瑞利散射测风激光雷达在西北某地外场实验期间与探空气球进行了实验对比, 如图 2 所示。探空气球垂直距离分辨力为 1 km 以下 70 m, 10 km 以下 100 m, 10 km 以上 200 m, 垂直上升速度 5 m/s, 上升高度 26 km, 上升过程历时约 90 min, 探空气球放飞点距离激光雷达 2 km。激光雷达每个径向方向测量 15 min, 径向距离分辨力 210 m, 累计 26 400 脉冲, 望远镜扫描天顶角  $30^\circ$ , 时间分辨力每廓线 15 min。由图 2 可见 20 km 以下有一明显的风速急流, 急流中心在 12 km 左右, 最大风速 40 m/s 以上, 最小风速在 20 km 处约 1 m/s, 此后风速缓慢增大; 风向变化特征明显, 18 km 以下风向  $290^\circ$  左右, 18 km 以上变换至  $90^\circ$  左右。激光雷达测量的风速风向廓线与探空气球测量结果吻合得非常好, 10 km 以下最大差距 3 m/s, 20 km 以下最大差距 4.5 m/s, 26 km 以下最大相差 10 m/s; 风向除拐点外 26 km 以下标准差最大  $32^\circ$ 。

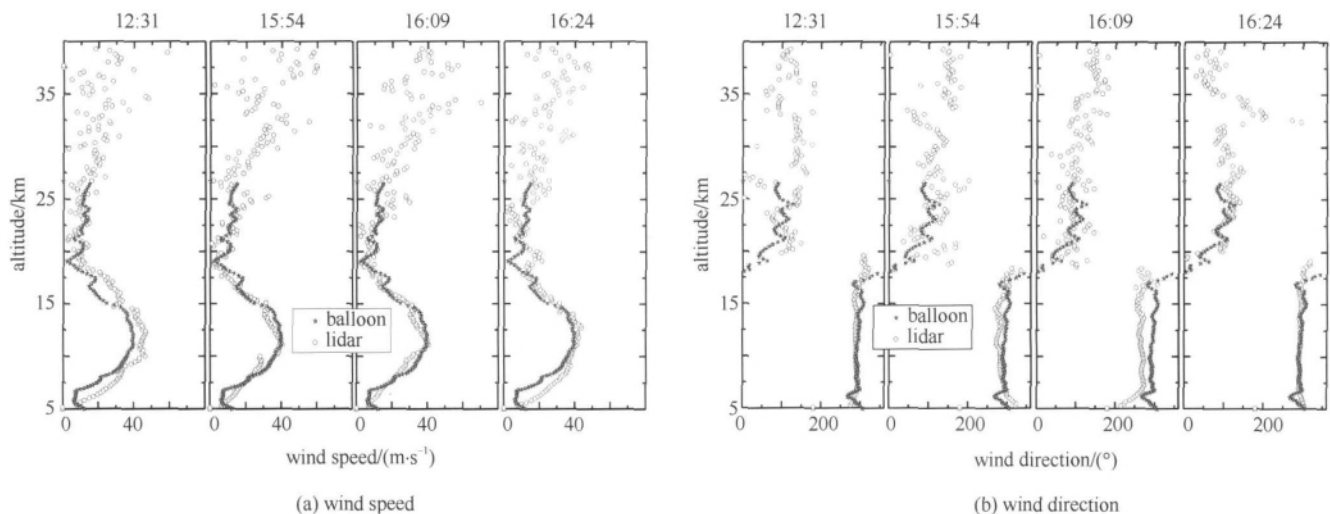


Fig. 2 Profiles of wind speed and direction measured by Rayleigh lidar system compared with data from pilot balloon on August 13, 2010

图 2 2010 年 8 月 13 日激光雷达与探空气球数据对比

将激光雷达与探空气球探测结果对比可以看出风速、风向变化也存在一定偏差, 原因主要有以下几个方面: (1) 二者探测方式不同, 误差来源不同, 激光雷达通过探测回波信号能量的变化来反演风速, 其误差主要来源于探测的信噪比和速度灵敏度的变化; 探空气球则通过固定时间间隔内空间位置的变化来确定风速。(2) 探测时间上存在一定差距, 探空气球上升过程大约历时 1.5 h, 空间大气风场的变化是导致误差的原因。(3) 激光雷达位置与探空气球释放点存在地域上差距, 相隔大约 2 km, 探空气球上升过程中受风力作用将偏离释放点, 根据统计结果平均偏离释放点水平距离 120 km, 而激光雷达以  $30^\circ$  天顶角观测, 垂直高度 40 km 处空间水平距离大约 25 km, 因此, 空间上的差距也可能造成二者探测结果上的差距。综合上述分析可以看出, 激光雷达常规探测结果与探空气球对比虽然存在一定误差, 但仍然可以说明激光雷达观测结果的稳定性与可靠性、反演方法的有效性<sup>[7-8]</sup>。

## 2 连续风场观测结果

外场实验主要在中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心实验场和某协作单位实验场进行。通过外场实验积累了部分平流层风廓线数据, 分析平流层风廓线随时间变化规律可以获得平流层气候变化规律, 有助于研究平流层大气动力学过程。

### 2.1 合肥地区平流层风场观测

从 2009 年 12 月 5~27 日, 在中国科学院大气光学中心实验场利用瑞利散射多普勒测风激光雷达进行了为期 20 多天的平流层风场连续观测。在连续的 22 天时间里, 除了阴雨天气激光雷达均进行常规观测, 系统运行稳定可靠, 检验了系统整体性能。图 3 显示 2009 年 12 月 5 日连续观测的几组风廓线。12 月 5 日激光雷达垂直距离分辨力 500 m, 扫描天顶角  $30^\circ$ , 利用径向数据循环方法改进后的时间分辨力每廓线 20 min, 从 01:09

~01:49 的 40 min 时间里连续输出的 3 组水平廓线可以看出, 2 个较大的风切变分别出现在 20 km 和 33 km 附近, 切变中心风速最大 40 m/s, 20 km 处切变较稳定, 33 km 处切变还在不断演化发展中, 风向随着切变的演化发展也有小的波动, 但波动不大, 相对比较稳定, 有由西南风向东风逐渐转化的趋势。

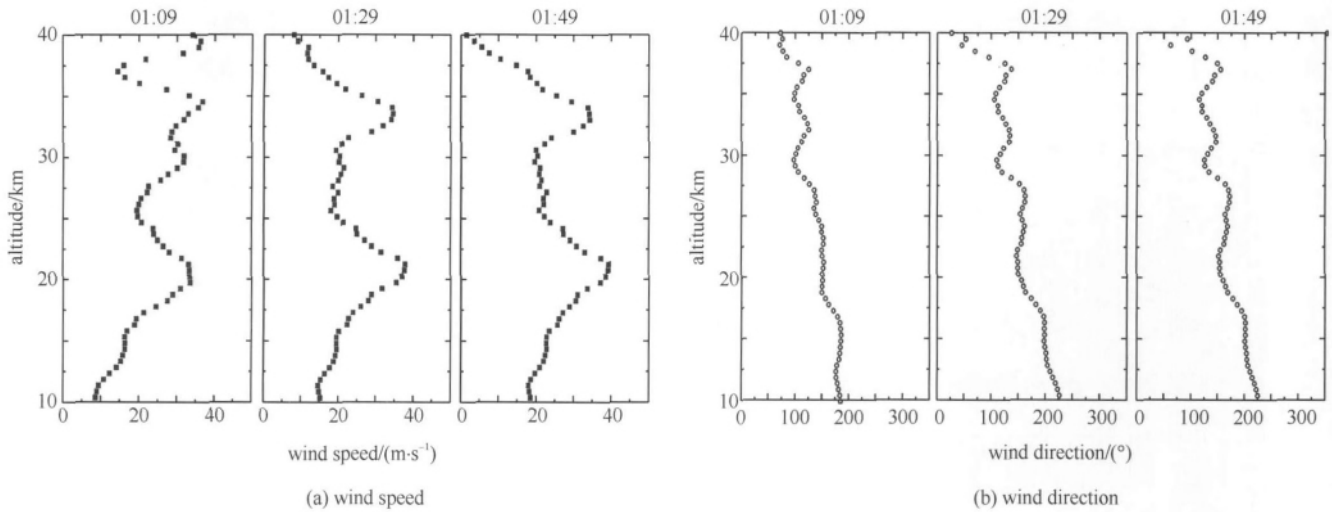


Fig. 3 Profiles of wind speed and direction measured by Rayleigh lidar system on December 5, 2009

图 3 2009 年 12 月 5 日瑞利散射激光雷达观测结果

2009 年 12 月 21 日, 激光雷达对平流层风场进行常规观测, 结果如图 4 所示。由图可见, 风速从 10 km 高度处开始随高度增加缓慢增大, 28 km 处风速达到最大, 最大值 30 m/s, 此后随高度增加逐渐减小; 风向则变化不大, 10~40 km 范围内缓慢向南偏移。风速、风向变化规律一致, 重复性很好, 说明平流层大气从 02:28~03:28 连续观测的 1 h 里非常稳定。

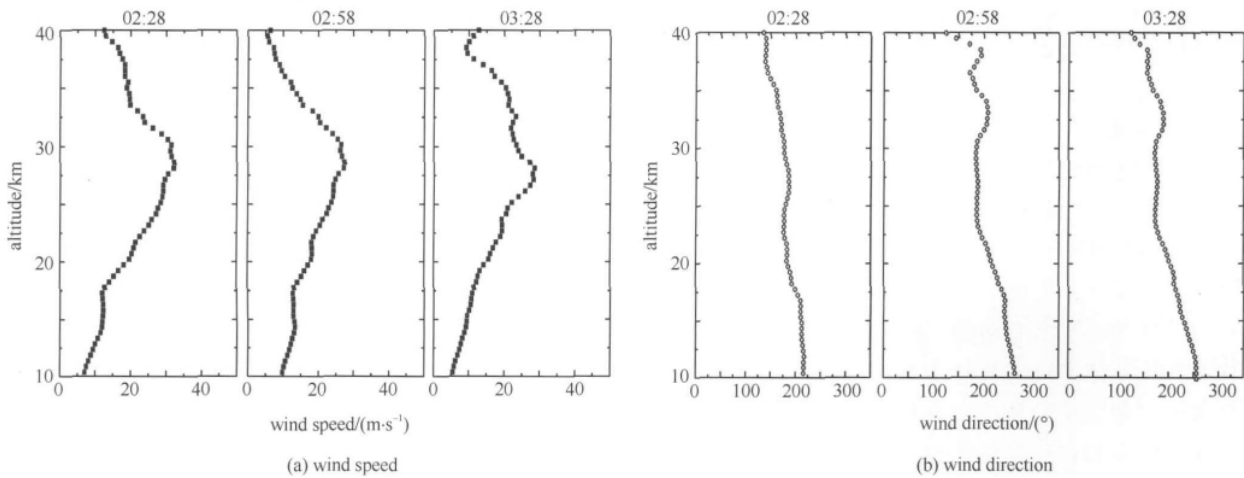


Fig. 4 Profiles of wind speed and direction measured by Rayleigh lidar system on December 21, 2009

图 4 2009 年 12 月 21 日瑞利散射激光雷达观测结果

从 2009 年 12 月合肥地区平流层风场连续观察的结果可以看出, 在 10~40 km 范围内一般会出现一个相对较大的急流, 急流中心最大风速 40 m/s 左右, 高度在 20~30 km 之间, 随着时间不同上下移动, 40 km 高度附近风速相对变化较快, 也可能是由于激光雷达随着探测高度增加信噪比降低导致的测量误差增大所致; 风向变化相对稳定, 在 10~40 km 高度范围内, 一般是从西或西南方向随高度增加逐渐向东偏移, 从观测结果看不会出现较大波动。

## 2.2 协作单位所在地区平流层风场观测

### 2.2.1 大尺度季节性气候特征

世界时 2010 年 8 月 2~10 日, 天气晴朗, 无云, 能见度非常高, 系统连续测量。激光雷达每个径向方向测量 15 min, 累计 26 400 脉冲, 望远镜扫描天顶角 30°, 径向距离分辨力 210 m, 时间分辨力每廓线 15 min, 连续观测结果如图 5 所示。探测结果清楚地显示了强劲的西风急流和东西风转换特征, 急流中心一般在 10~12

km 之间,从观测结果来看中心最大风速有时可接近 70 m/s,最小风速不低于 30 m/s,随着高度增加逐渐衰减,至 20 km 左右达到最小,风速最小不足 1 m/s,20 km 以上风速又开始逐渐增加;风向变化更加清楚,20 km 以下西风,变化范围一般在 240°~290°之间,随着时间不同在 270°左右变化,20 km 以上改变 180°变成东风,一般在 90°左右来回变化。由图 5 还可以看出,5 日以前风向在 270°以下西偏南较稳定,5 日开始风向逐渐向北偏移,越过 270°,有时在 300°左右变化;风向变换的同时伴随着拐点以上风速的减弱;9 日还清楚地观测到了风速、风向的瞬态扰动现象。另外,在 20 km 左右的拐点附近 1~2 km 范围内有时还会出现明显的北风区。

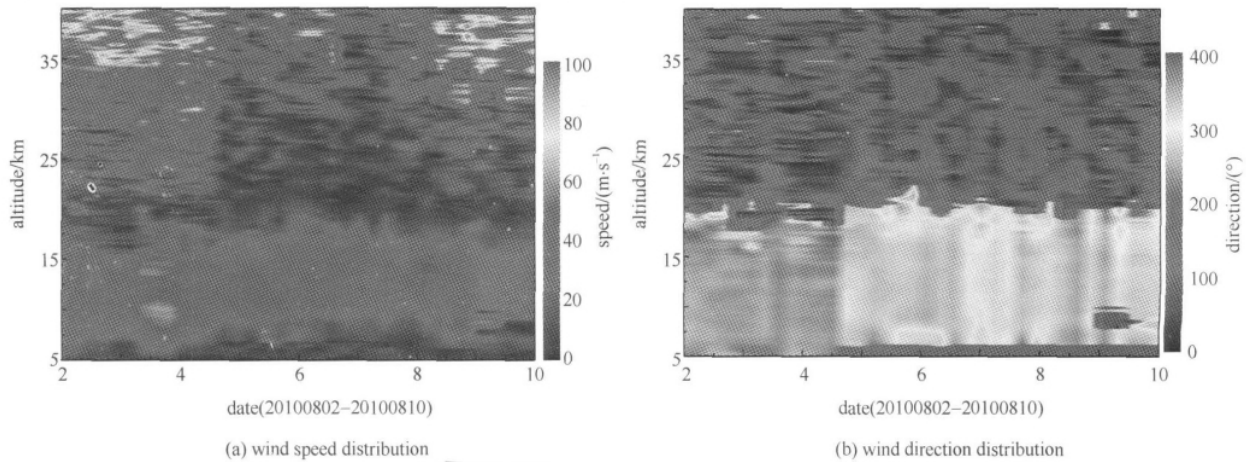


Fig. 5 Routine wind field detection result obtained by Rayleigh Doppler wind Lidar from August 2 to August 10, 2010

图 5 2010 年 8 月 2~10 日激光雷达连续风场测量结果

分析激光雷达外场实验中观测到的这种大尺度季节性的气候特征,其形成原因如下:在 5~10 km 的高空,空气从中纬度高压流向副极地低压,受科氏力影响,在北半球风会向右偏转,南半球则相反。同时,在高空因空气移动不受摩擦力影响,结果风沿平衡副极地低压的等压线移动,就这样形成势力强劲的西风带。这些西风,在 12 km 左右的高空最为强劲,风速最高可达 83 m/s,称为喷射气流。亦因为西风带风力强劲,因此形成西风带有强烈垂直风切变的情况,最高可达 51 m/s 以上<sup>[9]</sup>。激光雷达进行外场实验的 6,7,8 月期间,当地正是受西风带影响的季节,季风特征明显,此后西风带逐渐减弱并消失。

2.2.2 小尺度瞬态气候特征

探空气球与激光雷达在实验期间的常规观测中都曾观察到一些小尺度的瞬态气候特征,特别是在协作单位地区的外场实验期间。这些小尺度的瞬态气候现象是西风急流的瞬态扰动现象,其成因主要是南北半球对流层中上层的高纬度的西风气流,因不同尺度的波动和各种涡旋的叠加,通常呈波动状态。主要存在 3 种性质不同的波动:长波或行星波、短波和超长波。不同的波动影响着西风带中各种涡旋的生成、发展,如阻塞高压和切断低压等<sup>[10]</sup>。探空气球在常规的气象观测中探测到的位于对流层中上层的西风急流涡旋如图 6 所示。由于探空气球只能测量上升过程中所经路径处的风场,且两次放飞的时间间隔一般较长,因此不可能观察到涡旋生成、发展的过程。

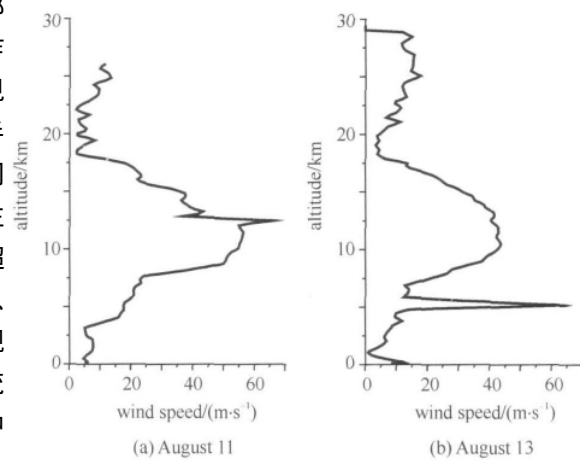


Fig. 6 Westerly jet transient eddy measured by pilot balloon on August 11 and 13, 2010

图 6 探空气球在 2010 年 8 月 11 和 13 日探测到的西风急流涡旋

激光雷达具有高时空分辨力、连续观测的优势,因此,能够观测到这种西风急流瞬态扰动完整的生成、发展过程。图 7 所示是瑞利散射测风激光雷达在 2010 年 8 月 14 日晚常规测量过程中观测到的西风急流涡旋。

为了说明激光雷达测量结果的有效性,将当天早些时间释放的探空气球数据用作对比。激光雷达观测到的西风急流瞬态扰动出现在 7.5 km 高度处,该处探空气球测得速度 22.2 m/s,且正处于速度迅速增大阶段,8.5

km 高度已达到 30 m/s。

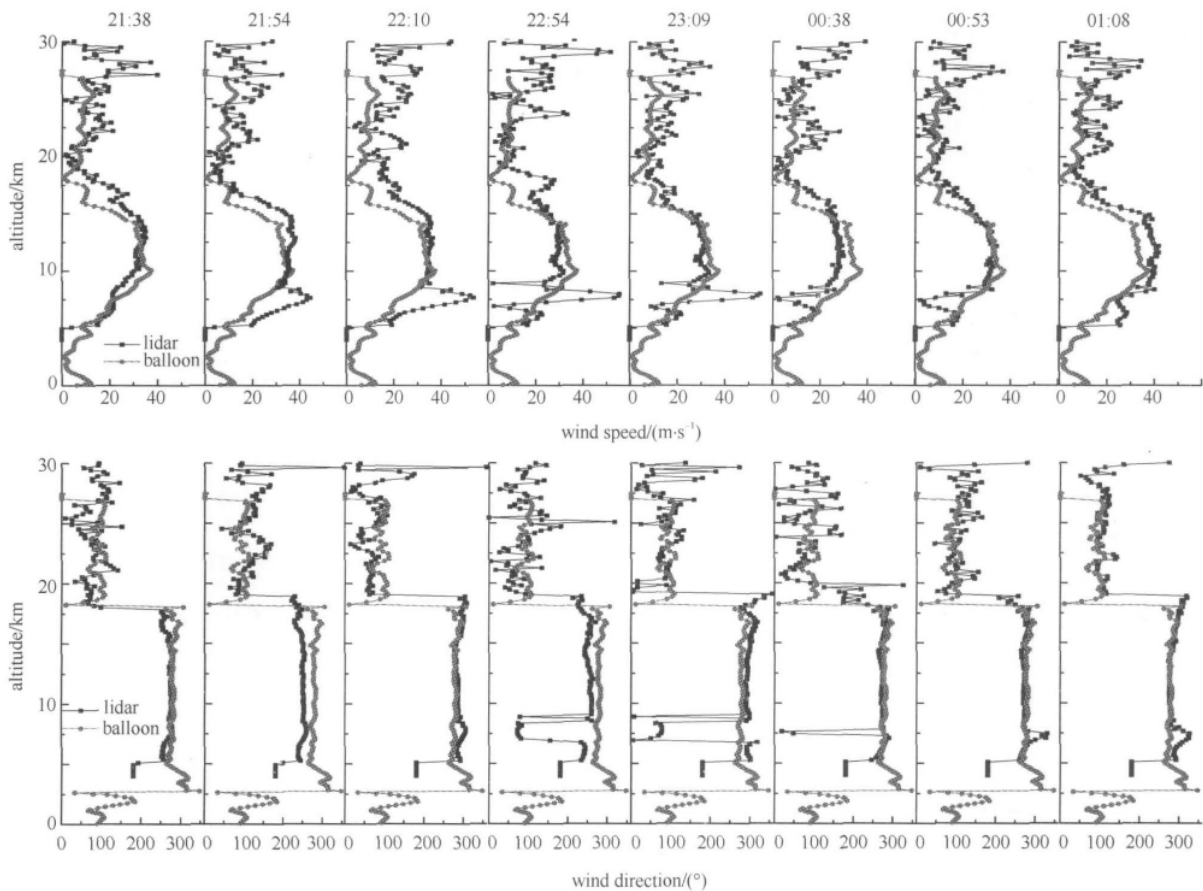


Fig. 7 Forming and evolving procedure of westerly jet transient eddy detected by Rayleigh Doppler wind lidar on August 14, 2010

图 7 2010 年 8 月 14 日瑞利散射测风激光雷达探测到的西风急流涡旋形成、演化过程

由图 7 可见 21:38 风速、风向均无变化;21:54 风速明显变化,比探空气球增加约 22.3 m/s,最大速度 44.5 m/s,风向变化不明显;22:10 速度变化更明显,7.5 km 处中心风速已增加到 53.5 m/s,方向也有明显变化趋势,增加 30.1°;22:54 风速中心已达最大值 55.3 m/s,上下边界层速度非常小,分别为 2.3 和 1.8 m/s,中心风向在 45 min 内由原来的 305.8°减小至 72.3°,表明低空急流已经形成;23:09 中心风速开始逐渐减小,最大值 54.7 m/s,但上下边界层速度变化非常明显,分别为 13.1 m/s 和 8.9 m/s,逐渐趋近正常值,而且边界层方向变化也非常明显,已接近 0°,分别为 6.2°和 7.8°;00:38 中心风速衰减至最小值 1.9 m/s,边界层风向变化已经消失,只有中间两点,最小值为 19.5°;00:53 中心风速略有增大,趋向正常值,风向变化明显,已由 19.5°转变至最大值 331.0°;01:08 速度基本恢复正常,方向变化稍慢,也已基本恢复正常,最大值 327.0°。

至此,西风急流瞬态扰动经历了一个完整的变化过程,从开始出现到完全形成经历了大约 1 h,形成后维持了很短时间就开始逐渐减弱,先是边界层风向变化非常明显,后是中间逐渐变化,中心速度经历了从 55.3~1.9 m/s 的变化过程,衰减过程历时 2 h,整个变化过程从开始到结束共历时 3 h,形成过程快于衰减过程,风速变化快于风向变化。

### 3 结 论

从激光雷达探测结果与探空气球对比可以看出,风速风向变化趋势与探空气球吻合得比较好,特别是西风急流与风向转换特征体现得非常明显,很好地反映了风场变化的规律。虽然激光雷达探测结果与探空气球对比存在一定误差,但仍然可以说明激光雷达观测结果的稳定性与可靠性、反演方法的有效性。连续观测结果表明:瑞利散射测风激光雷达可以为气象、气候和大气动力学研究及相关应用提供数据支持;同时还能够用于小尺度瞬态气候特征的测量,为气象、气候和大气动力学研究提供更详细的数据支持。

## 参考文献:

- [1] Garnier A, Chanin M. Description of a Doppler Rayleigh lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. *Appl Phys B*, 1992, **55**(1): 35-40.
- [2] Korb C, Gentry B, Weng C. The edge technique: Theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds[J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(21): 4202-4213.
- [3] Korb C, Gentry B, Li S. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(24): 5976-5983.
- [4] Gentry B, Chen H. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): Validation and performance[C]//Proc of SPIE. 2002, **4484**: 74-81.
- [5] Gentry B, Chen H. Profiling tropospheric winds with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW)[C]//21th Int Laser Radar Conf. 2002.
- [6] Tang Lei, Wang Yongtao, Shu Zhifeng, et al. Analysis of detectors and transmission curves correction of mobile Rayleigh Doppler lidar[J]. *Chin Phys Lett*, 2010, **27**: 114207.
- [7] Xia Haiyun, Sun Dongsong, Yang Yang, et al. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(29): 1720-1731.
- [8] Shen Fahua, Cha H, Sun Dongsong, et al. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar[J]. *Opt Rev*, 2008, **15**(4): 204-209.
- [9] 张文龙, 董剑希, 王昂生, 等. 中国西南低空急流和西南低层大风对比分析[J]. 气候与环境研究, 2007, **12**(2): 199-210. (Zhang Wenlong, Dong Jianxi, Wang Angsheng, et al. Contrastive analyses of southwesterly low jet and low level strong wind in China. *Climatic and Environmental Research*, 2007, **12**(2): 199-210)
- [10] 任雪娟, 杨修群, 周天军, 等. 冬季东亚副热带急流与温带急流的比较分析: 大尺度特征和瞬变扰动活动[J]. 气象学报, 2010, **68**(1): 1-11. (Ren Xuejuan, Yang Xinqun, Zhou Tianjun, et al. Diagnostic comparison of the east Asian subtropical jet and polar-front jet: Large-scale characteristic and transient eddy activities. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, **68**(1): 1-11)

## Analysis of wind field measurement results of Doppler lidar

Tang Lei<sup>1,3</sup>, Dong Jihui<sup>2</sup>, Wu Haibin<sup>3</sup>

(1. Department of Physics and Electronic Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230031, China;

2. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Physics School, Anhui University, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The wind profiles measured by a Rayleigh Doppler wind lidar are in good agreement with the pilot balloon wind profiles. The maximum discrepancy of the wind profiles of both the lidar and the pilot balloon is 3 m/s below 10 km and 4.5 m/s below 20 km. The maximum standard deviation of wind direction is 32° except for the inflexion at about 20 km altitude. The sequential detection results made by the lidar show the clear intense westerly jet with a local maximum speed of 70 m/s at about 10-12 km altitude, and a local minimum speed no less than 30 m/s. The minimum wind speed is less than 1 m/s at about 20 km altitude and wind speed increases with the altitude increasing above the inflexion. The wind direction is west wind of about 270° below the inflexion and east wind of about 90° above the inflexion. The capability of Rayleigh Doppler wind lidar, tracking the variation law of large scale season climate characteristics while giving prominence to the forming and evolving procedure of small scale transient climate characteristics, has been demonstrate.

**Key words:** lidar; Rayleigh backscattering; wind field; climate characteristics