

我国中纬度地区多普勒激光雷达准零风层多季节观测与分析

王元祖^{1,2}, 韩於利^{1,2}, 孙东松^{1,2*}, 韩飞^{1,2}, 周安然^{1,2}, 张楠楠^{1,2}, 唐磊³

- (1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026;
2. 中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽合肥 230026;
3. 合肥师范学院物理与电子工程系, 安徽合肥 230601)

摘要: 一台基于分子双边缘鉴频技术的车载瑞利多普勒激光雷达系统, 于 2014 年至 2016 年先后在山西忻州 (38.42°N 112.72°E) 和甘肃酒泉 (39.74°N 98.49°E) 地区对平流层风场进行连续观测。观测结果表明: 18~25 km 范围内, 酒泉春、秋季节以及忻州冬季均出现了准零风层大气结构, 并伴有明显的上下浮动现象, 该准零风层结构与 2011 年夏季新疆乌鲁木齐 (42.1°N 87.1°E) 多普勒激光雷达系统观测到的结果具有明显差异。分析认为: 由于 5 月与 10 月处于短暂的季节过渡时期, 中纬度地区平流层东风环流尚未稳定导致零风线的上下浮动; 2015 年 1 月忻州地区出现平流层准零风层与平流层爆发性增温有关。

关键词: 多普勒激光雷达; 直接探测; 平流层; 准零风层

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0305004

Multi-season observation and analysis of quasi-zero wind layer based on Doppler lidar in middle latitudes of China

Wang Yuanzu^{1,2}, Han Yuli^{1,2}, Sun Dongsong^{1,2*}, Han Fei^{1,2}, Zhou Anran^{1,2}, Zhang Nannan^{1,2}, Tang Lei³

- (1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. CAS Key Laboratory of Geospace Environment, Hefei 230026, China;
3. Department of Physics and Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China)

Abstract: A mobile Rayleigh Doppler lidar system based on molecular double-edge technique, it was applied to Shanxi Xinzhou (38.42°N 112.72°E) and Gansu Jiuquan (39.74°N 98.49°E) continuous observations of stratospheric wind from 2014 to 2016. The wind data analysis results shows that: During the observation period, within the range of 18-25 km, the atmospheric structure of quasi-zero wind layer appeared in Jiuquan spring, autumn season and Xinzhou winter, and there was a phenomenon of floating up and down. The observed results are obviously different from the quasi-zero wind layer observed in Urumqi (42.1°N 87.1°E) in summer 2011. The analysis is that the stratospheric easterly circulation in the mid-latitude region of the mid-latitude region has not been stable and the zero-wind line is floating up and down due to the short-season transition period in May and October, and the stratospheric quasi-zero wind layer in the region of January 2015 may be related to the explosive temperature rise of the stratosphere.

Key words: Doppler lidar; direct detection; stratosphere; quasi-zero wind layer

收稿日期: 2019-12-03; 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (41774193, 41574180)

作者简介: 王元祖 (1993-), 男, 博士生, 主要从事多普勒测风激光雷达系统方面的研究。Email: yz1w1@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 孙东松 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事测风激光雷达方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

0 引言

Belmont 等 (1975) 通过利用多种探测手段所获取到的风场数据对平流层风场进行研究发现在冬夏转换期间, 纬向风向会发生翻转, 在东西风区之间存在较低风速的纬向风转换层^[1]; 吕达仁等 (2002) 针对临近空间飞行器的特点, 提出准零风层 (Quasi-Zero Wind Layer, QZWL) 的概念, 指在平流层底部 20 km 高度附近的大气层中, 上下层纬向风风向相反, 同时南北风分量亦很小^[2]; 肖存英等 (2008) 利用 ECMWF 提供的 ERA-40 再分析风场资料首次分析了中国上空平流层准零风层特点及其随季节和地理位置的变化特征^[3]; 陶梦初等 (2012) 同样对 ERA-40 再分析数据进行统计, 并根据形成机制的不同将平流层准零风层划分为两类^[4]。了解平流层风场变化规律以及确定预报准零风层出现的时间和高度范围, 对于平流层中低速飞行的特殊飞行器的设计、试验和运行都具有十分重要的意义^[5]。由于目前人们对大气风场观测数据不足, 观测手段有限, 国内针对准零风层的研究工作多是利用 ECMWF 等模式数据进行统计分析寻求规律, 而实时观测数据将更有利于对风场规律的分析 and 准确预报平流层准零风层的变化。瑞利多普勒激光雷达以其能够提供实时高时空分辨率的风场信息这样的显著优势, 正逐渐在特殊飞行器的环境保障以及临近空间大气探测中扮演越来越重要的角色^[6]。基于此, 多普勒激光雷达系统所观测到的风场数据对于准零风层的研究具有十分重要的参考价值。

中国科学技术大学曾报道使用一台基于双边鉴频技术的多普勒激光雷达系统于 2011 年夏季在中国新疆乌鲁木齐地区观测到平流层准零风层大气结构^[7-9]; 车载瑞利测风激光雷达是中国科学技术大学研制完成的又一套车载多普勒测风激光雷达系统, 该系统可以利用空气分子后向散射信号探测 15~60 km 高度范围内的大气风场^[10-11]。基于对该系统往年风场观测数据进行分析发现, 于 2014 年冬季在山西忻州以及 2015 年秋季、2016 年春季在甘肃酒泉地区均观测到在海拔 20 km 附近出现的平流层准零风层大气结构。文中首先对车载激光雷达系统进行介绍, 之后对不同季节在不同地区观测到的准零风层特点及成因进行分析。

1 多普勒激光雷达系统

车载多普勒激光雷达系统已有文章对其详细报道^[10-11], 在这里仅做简要介绍。该激光雷达系统由三个探测子系统组成: 垂直指向测温子系统和两个斜指向望远镜仰角 60°测风子系统。如图 1(a) 所示, 三套子系统集成在两辆卡车上, 用于观测 15~60 km 高度范围内大气风场、温度信息。所有子系统激光器均采用种子注入式 Nd:YAG 激光器 (Continuum Powerlite 9050), 基频波长 1 064 nm, 经过三倍频后, 出射光脉冲波长 354.7 nm, 重复频率 50 Hz, 单脉冲能量 350 mJ。脉冲光经过口径 180 mm 扩束器扩束 18 倍后射入大气以减小激光出射光束发散角, 与大气中空气分子相互作用后的携带多普勒频移的瑞利散射回波信号由 1 m 口径的反射式卡塞格林望远镜所接收。回波信号光由芯径 200 μm, 数值孔径 0.22 的多模光纤导入光学接收机, 后经过数据处理反演得到大气风场信息。

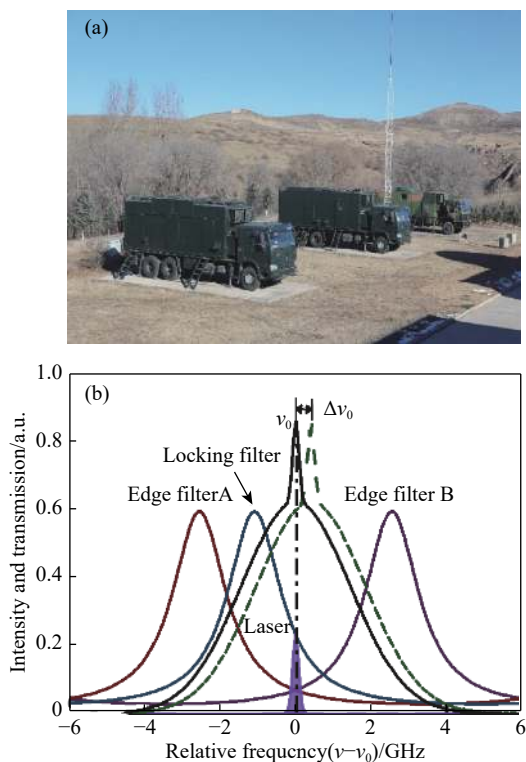


图 1 多普勒激光雷达外场试验照片及测量原理图

Fig.1 Doppler lidar in experiment and detection principle of the lidar

基于分子双边缘鉴频技术的可调谐式三通道 Fabry-Perot 标准具是光学接收机的核心器件, 它可以将大气分子的后向散射信号中的多普勒频移转变为

线与无线电探空仪的结果变化趋势相近, 风速最大偏差 10.4 m/s, 风向最大偏差 26°, 观测结果一致性较

好。多次比对试验结果表明车载瑞利多普勒激光雷达系统性能稳定, 测量数据准确可靠。

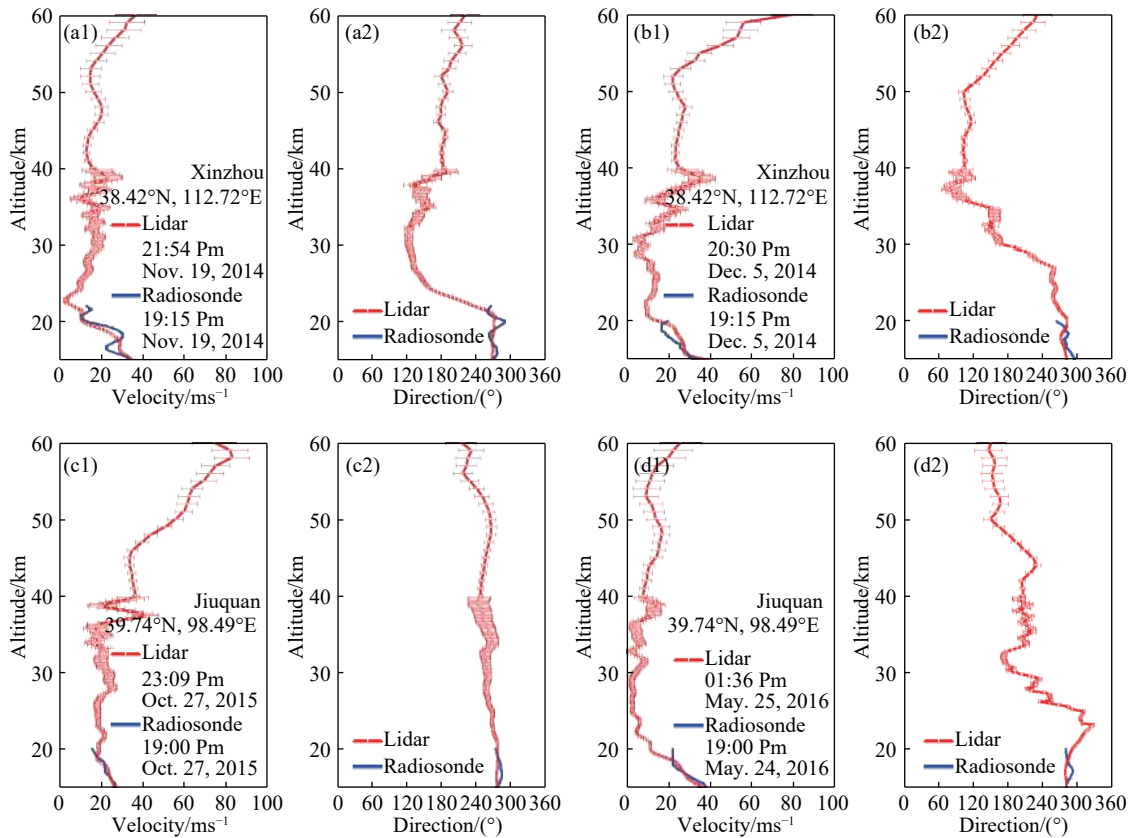


图 3 忻州、酒泉地区对比试验观测结果

Fig.3 Observation results of comparative test in Xinzhou and Jiuquan area

3 准零风层多季节观测

平流层准零风层 (Quasi-Zero Wind Layer, QWZL) 一般是指在平流层 20 km 高度附近的大气层, 上下层纬向风风向相反, 同时南北风分量亦很小^[2]。车载多普勒测风激光雷达系统在忻州和酒泉地区进行风场观测期间均观测到准零风层大气结构。

3.1 春、秋季节观测结果分析

图 4 为激光雷达系统于 2016 年 5 月以及 2015 年 10 月在甘肃酒泉 (39.74°N 98.49°E) 进行大气风场探测获得的风速、风向连续风场分布 (晴天夜间观测, 时间分辨率 30 min)。5 月风场垂直分布如图 4(a)、(c) 所示, 15~60 km 范围内随着海拔的升高, 风速出现先减小后增大的变化趋势。该月平流层底层以西风为主, 20 km 以上高度东南风成为主导风向。酒泉地区 10 月风场

垂直分布如图 4(b)、(d) 所示, 风速随高度变化趋势同样先减小后增大。10 月中上旬出现平流层准零风层, 对应风向呈现三层结构: 20 km 以下高度主导风向为西北风, 20~32 km 范围出现东风层, 32 km 以上高度西风占主导。10 月下旬准零风层消失, 15~60 km 观测范围内主导风向为西风。车载多普勒测风激光雷达风场观测结果与该地区风场垂直分布规律相符。

图 5(a)、(b) 为激光雷达系统在酒泉 5 月和 10 月纬向风观测结果。准零风层特征明显, 在图中表现为一条酒泉地区上空东西纬向风的交界线 (白色零风线), 准零风层下层的西风 (红色表示) 折转为上层的东风 (蓝色表示), 并且在对应高度层内经向风的数值很小 (图未给出)。酒泉地处我国中纬度地区, 准零风层的形成原因可以用热成风原理进行解释。在此引入对数压力系下的垂直坐标^[4]:

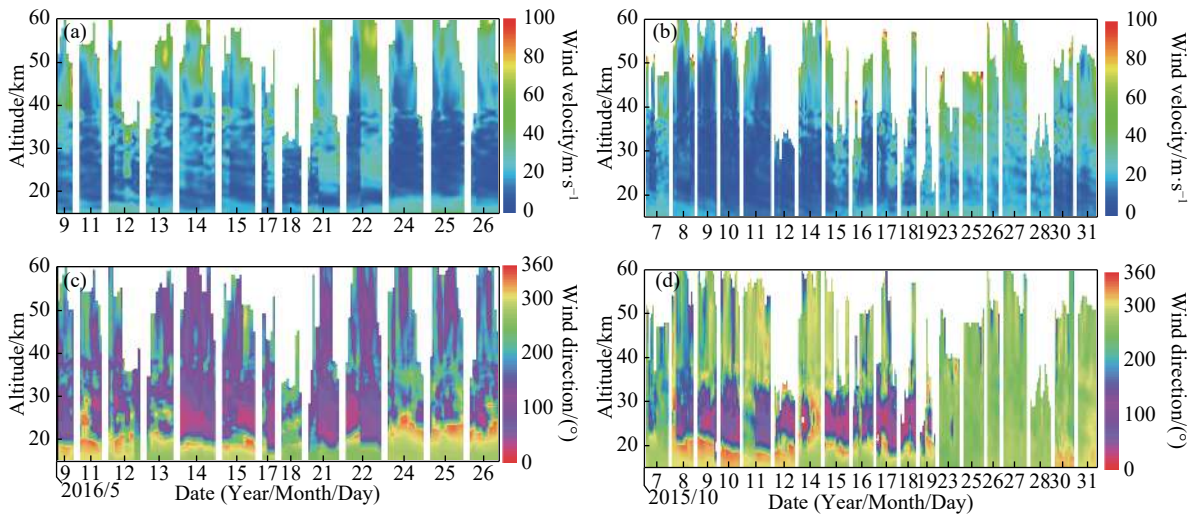


图 4 2016 年 5 月、2015 年 10 月酒泉风场连续分布

Fig.4 Continuous distribution of wind field in Jiuquan in May. 2016 and Oct. 2015

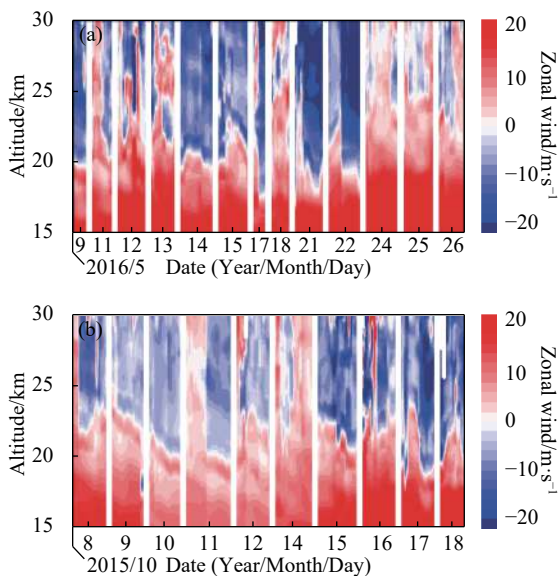


图 5 2016 年 5 月、2015 年 10 月酒泉地区准零风层大气结构的观测结果

Fig.5 Observation results of quasi-zero wind layer in Jiuquan in May. 2016 and Oct. 2015

$$z = -H \ln(p/p_s) \quad (2)$$

式中： z 为对数压力高度；高度 $H=RT_s/g_0$ ， R 为干空气比气体常数， T_s 为全球平均参考温度， g_0 为重力加速度； p 和 p_s 分别为气压和参考气压。在对数压力坐标系中，可导出对数压力坐标系下的热成风方程为^[4]：

$$\frac{\partial \bar{u}_g}{\partial z} = -\frac{R}{f \cdot H} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \quad (3)$$

式中： f 为科里奥利力参数； \bar{u}_g 为平均地转纬向风；

\bar{T} 为两层大气间的平均温度； $\partial \bar{T} / \partial y$ 为平流层平均温度的纬向梯度分布。

由公式 (3) 可知，平流层纬向风分布与对流层上部的风场和平流层平均温度的纬向梯度有关。平流层大气温度主要受到臭氧吸收紫外辐射增温的影响，中纬度地区纬圈平均温度梯度夏季是由低纬指向高纬 (冬季相反)，即 $\partial \bar{T} / \partial y > 0$ ，则 $\partial \bar{u}_g / \partial z < 0$ 。地转纬向风随高度的增加而减弱，直至某一高度处西风减弱为零甚至反向成为东风环流，形成准零风层，零风线下层为西风，上层为东风。甘肃酒泉 5 月平流层处于冬夏季转换时期，由于高低纬度热力状况的翻转，使该地区的热成风转为东风，准零风层大气结构出现。10 月平流层处于西风环流逐渐恢复时期，如图 4(b) 所示，该月中上旬准零风层尚未消失，18 日以后平流层西风环流盛行，准零风层消失。

中国科学技术大学曾于 2011 年夏，在新疆乌鲁木齐 (42.1°N 87.1°E) 使用另一台多普勒激光雷达系统观测到准零风层大气结构^[7-9]，并且其观测结果和图 5 中所示的酒泉地区 5 月与 10 月出现的准零风层结构具有明显的差异。分别挑选了酒泉 2016 年 5 月、2015 年 10 月以及乌鲁木齐 2011 年 9 月风场观测数据中的 5 天观测结果进行比较，如图 6 所示，其中红色线条表示每一天观测结果中零风线起始位置。根据图 6(c) 可以看出在乌鲁木齐夏季观测到的准零风层其底部高度稳定在 18 km，并未出现较大范围的抖动，逐日变化幅度较小；而在图 6(a)、(b) 中，酒

泉地区 5 月与 10 月观测到的准零线均出现了明显的上下浮动, 浮动范围在 16~25 km。酒泉与乌鲁木齐地区准零风层成因均可用热成风原理进行解释, 分析两地观测结果差异是由于观测季节不同所致。5 月与 10 月是典型的短暂季节过渡时期, 该时节中纬度地区平流层东风环流尚未稳定, 造成零风线的上下浮动, 根据图 5 可以看出零风层最大厚度未超过 2 km; 9 月正值平流层东风环流盛行时期, 零风线起始高度较低, 清晰且稳定, 准零风层厚度最大值可超过 15 km^[7], 此观测结果符合夏季中纬度地区准零风层结构特征。综上所述, 我国中纬度地区春、秋季节准零风层与夏季准零风层结构特点具有明显的不同。

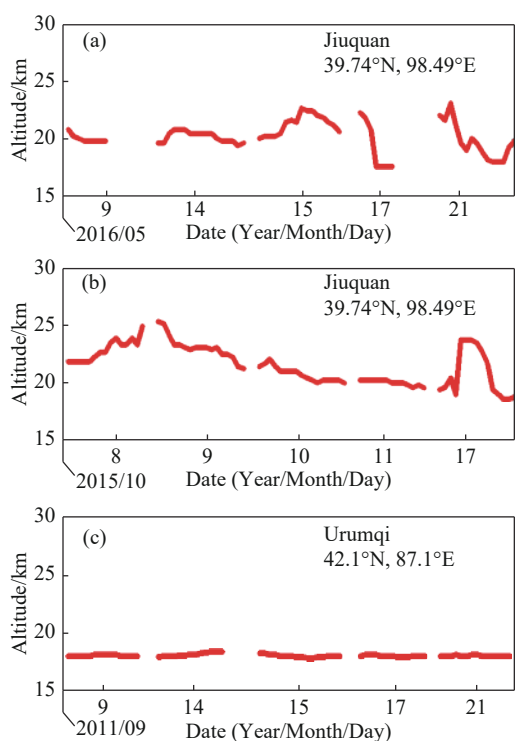


图 6 多季节零风线观测对比结果

Fig.6 Observation and comparison of zero wind line from multi-season

ECMWF 提供的再分析风场数据资料也是研究大气准零风层的有效手段, 其分析结果表明^[3-4]: 我国中高纬地区 (32.5°N~55°N) 一般在 5 月初至 10 月底会出现准零风层结构。18~25 km 高度范围内纬向风存在零风线, 夏季最低, 大约位于 19 km, 5 月与 10 月零线位置较高, 大约位于 23 km, 其高度随地理位置的不同稍有变化。夏季平流层底部风场相对稳定, 逐日变化较小。乌鲁木齐和酒泉均属于中高纬度地区, 中国科学技术大学使用瑞利多普勒测风激光雷达系统

在该两地区所观测到的准零风层特征与 ECMWF 提供的再分析风场数据资料特征相吻合。

3.2 冬季观测结果分析

2014 年 12 月至 2015 年 1 月在山西忻州 (38.42°N 112.72°E) 进行大气风场观测获得的风速、风向连续风场分布如图 7(a)、(b) 所示 (晴天夜间观测, 时间分辨率 30 min)。在 15~60 km 观测范围内风速呈现先减小后增大的变化趋势。12 月下旬至 1 月上旬, 风向呈现三层结构: 15~22 km 范围主导风向为西北风, 22~35 km 范围内为东风层, 35 km 以上主导风向变为西南风, 海拔 23 km 附近出现平流层准零风层大气结构。在我国中纬度地区冬季观测到准零风层现象实属罕见, 选取 2014 年 12 月 28 日以及 2015 年 1 月 11 日两晚激光雷达系统与当地无线电探空仪风场探测数据进行对比, 以验证激光雷达系统准零风层观测结果的可靠性。无线电探空仪放飞场与激光雷达设备位置相同, 车载多普勒激光雷达与无线电探空仪试验条件和环境基本一致, 具备比对试验环境要求。两种观测方式获取的纬风向垂直分布如图 8(a)、(b) 所示, 图中蓝色线条代表无线电探空仪探测数据, 红色为激光雷达系统观测数据。在低平流层区域 (15~30 km), 多普勒激光雷达与无线电探空仪纬向风垂直分布结果一致性较好, 并且由图可知在 12 月 28 日晚准零风层出现区域位于 23 km 附近, 1 月 11 日晚准零风层在 18 km 附近出现。上述两次对比结果再次证明车载多普勒激光雷达系统风场观测数据准确可靠。

图 9 为激光雷达系统在忻州地区冬季纬向风观测结果, 纬向风垂直分布出现明显的准零风层结构特征: 在海拔 23 km 高度附近风速基本为零 (图中白色区域), 零风线上层和下层纬向风风向相反。图中准零风层在 18~25 km 范围内出现上下浮动。通常情况下, 冬季温度极大区约在北纬 45°, 并向极地和赤道方向递减, 在中纬度地区纬圈平均温度梯度由高纬指向低纬, 根据热成风原理^[4], 平流层冬季为强的西风环流, 不会出现平流层准零风层现象。但是从图 9 可以看出, 2014 年冬季我国忻州地区出现了较为明显的准零风层, 分析我国中纬度地区冬季出现准零风层大气结构成因可能与平流层爆发性增温事件 (Stratospheric Sudden Warming, SSW) 有关。平流层爆发性增温事件是指北半球平流层大气短时间内温度急剧增加并

伴随环流结构突变的现象,在短期内可升高至 40 ℃ 以上^[13-14]。该现象主要发生在冬季极区平流层,但很多观测和模拟研究已经证实其对全球大气层都具有重要影响^[15-16],而在 2014 年忻州冬季观测到的准零风层成因就有可能与此有关。在爆发性增温事件期间,平流层极涡发生强烈扰动或崩溃,高低纬度温度

梯度发生翻转,从低纬指向高纬,结合热成风方程(3)可知地转纬向风随着高度的增加而减小,我国中纬度平流层高度处原有的西风环流减速并逆转为东风环流,形成准零风层。在图 9 中准零风层出现上下浮动现象表明由于特殊事件所引发的准零风层大气结构并不稳定。

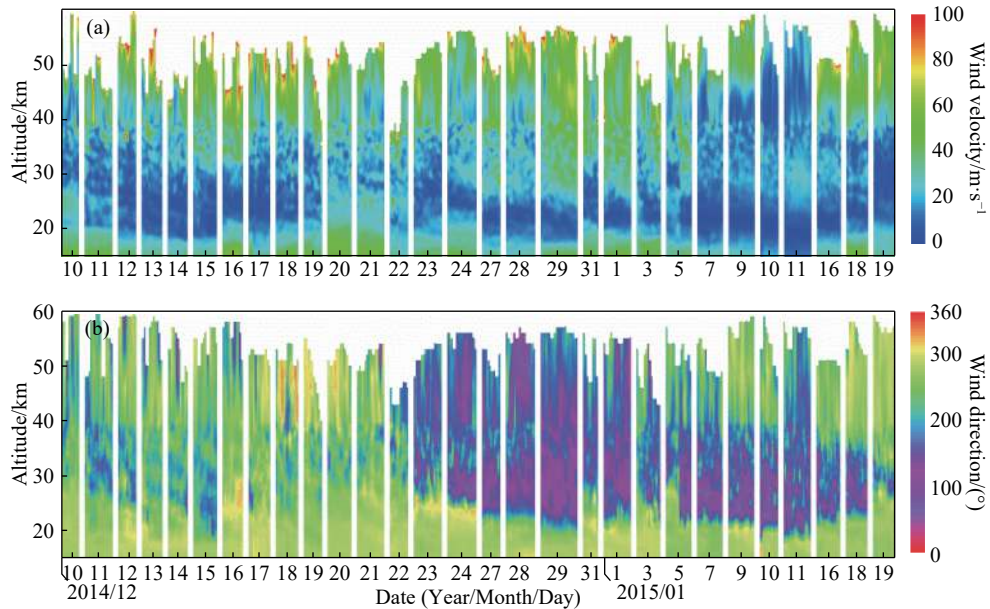


图 7 2014 年 12 月、2015 年 1 月忻州风场连续分布

Fig.7 Continuous distribution of wind field in Xinzhou in Dec. 2014 and Jan.2015

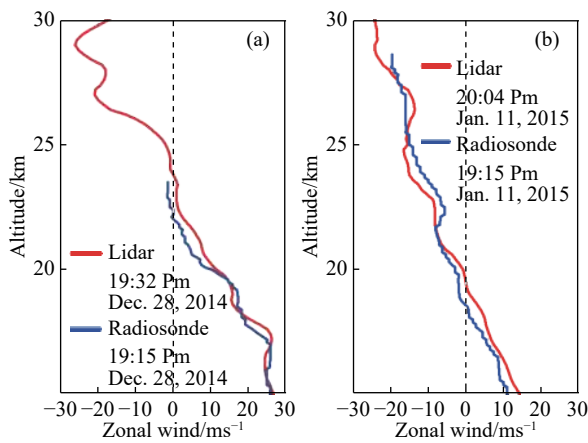


图 8 准零风层激光雷达与无线电探空仪比对结果

Fig.8 Comparison between quasi-zero wind layer lidar and radiosonde observation

4 结 论

基于可调谐三通道 Fabry-Perot 标准具的车载瑞利多普勒激光雷达系统于 2014 年至 2016 年先后在

我国的山西忻州、甘肃酒泉等地进行了连续观测并观测到平流层准零风层大气结构。分析结果表明:(1)在 15~60 km 高度范围内,风场风速随着海拔升高出现先减小后增大的变化过程;(2)在 16~25 km 范围内,5 月与 10 月酒泉地区均观测到准零风层,其上下纬向风向相反,对应高度经向风速较小。该观测结果与 2011 年夏季新疆乌鲁木齐地区多普勒激光雷达系统所观测到的准零风层进行比较发现:夏季准零风层出现高度较低,准零风层底部高度稳定,风向分界线清晰;春、秋季节准零风层出现明显的上下浮动及厚度变化。分析成因,春、秋季节为短暂的冬夏季转换时期,中纬度地区平流层东风环流不稳导致准零风层出现上下浮动及厚度变化;夏季为平流层东风环流盛行时期,准零风层高度稳定且厚度最大值可超过 15 km;(3)2014 年 12 月至 2015 年 1 月在山西忻州地区观测到准零风层,其观测结果与无线电探空仪探测结果一致。笔者认为,在我国中纬度地区冬季观测到

准零风层与低概率发生的平流层爆发性增温事件有关。

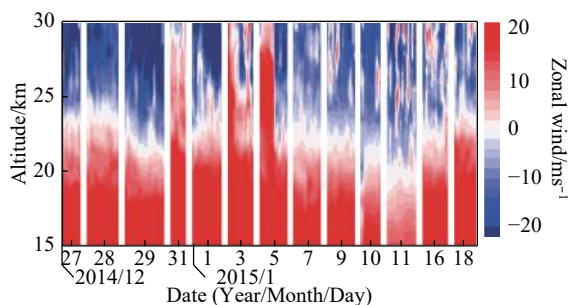


图 9 2014 年 12 月、2015 年 1 月忻州地区准零风层大气结构的观测结果

Fig.9 Observation results of quasi-zero wind layer in Xinzhou in Dec.2014 and Jan. 2015

了解掌握平流层准零风层的特点及其变化特征,对于平流层大气环境的利用具有重要意义,车载多普勒激光雷达系统所观测到的风场数据对于准零风层的研究具有重要参考价值。文中基于多普勒激光雷达系统往年连续观测数据,对我国中纬度地区多季节观测到的准零风层成因及特点进行分析。但鉴于大气环境的复杂性,可能还存在其他影响因素需要进一步的讨论与研究,这将依赖于多普勒激光雷达系统未来更为丰富的大气风场观测数据。

参考文献:

[1] Belmont A D, Dartt D G, Nastrom G D. Variations of stratospheric zonal winds, 20~65 km, 1961-1971 [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1975, 14(4): 585-594.

[2] Lv Daren, Sun Baolai, Li Liqun. Zero wind layer and the first dwell experiment of high-altitude balloon in China [J]. *Target Environment Feat*, 2002, 22(1): 45-51. (in Chinese)

[3] Xiao Cunying, Hu Xiong, Gong Jiancun, et al. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer over China [J]. *Chin J Space Sci*, 2008, 28(3): 230-235. (in Chinese)

[4] Tao Mengchu, He Jinhai, Liu Yi, et al. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer and the effects of the quasi-biennial oscillation on it [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, 17(1): 92-102. (in Chinese)

[5] Wang Yiping, Zhou Fei, Xu Ming, et al. Research on control strategy of territory-hovering aerostat in near space [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2018, 38(1): 63-69. (in

Chinese)

[6] Salonen K, Haase G, Eresmaa R, et al. Towards the operational use of Doppler radar radial winds in HIRLAM [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 100(2): 190-200.

[7] Hu Dongdong, Shu Zhifeng, Sun Dongsong, et al. Quasi-zero wind layer measured by Rayleigh wind lidar at night [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 38(1): 482-485. (in Chinese)

[8] Wang G C, Sun D S, Shu Z F, et al. Low stratospheric zero wind layer measurement with Rayleigh Doppler lidar[C]//SPIE Proceedings[SPIE ISPDI 2013- Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging] International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Sensing and Imaging and Applications , 2013, 8905: 890504.

[9] Han Y, Sun D S, Weng N Q, et al. Lidar observations of wind over Xin Jiang, China: general characteristics and variation [J]. *Optical Review*, 2016, 23(4): 637-645.

[10] Dou Xiankang, Han Yuli, Sun Dongsong, et al. Mobile Rayleigh Doppler lidar for wind and temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere [J]. *Optics Express*, 2014, 22(S5): A1203.

[11] Han Yan, Sun Dongsong, Wong Ningquan, et al. Development of 60 km mobile Rayleigh wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1414-1419. (in Chinese)

[12] Zheng Jun, Sun Dongsong, Dou Xiankang, et al. 60 km Rayleigh Doppler lidar and wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1030002. (in Chinese)

[13] Yang Guang, Li Chongyin, Li Lin. Advance in research on stratospheric sudden warming and its influences [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(6): 694-708. (in Chinese)

[14] Li Yafei, Hu Jinggao, Ren Rongcai. A case study of the Northern Hemisphere stratospheric sudden warming in the winter of 2009 [J]. *Plateau Meteor*, 2017, 36(6): 1576-1586. (in Chinese)

[15] Zhu Lu, Jiang Guoying, Xu Jiyao, et al. Quasi-16-day planetary waves during sudden stratospheric warming event [J]. *Space Sci*, 2017, 37(4): 432-441. (in Chinese)

[16] Mbatha N, Sivakumar V, Malinga S B, et al. Study on the impact of sudden stratosphere warming in the upper mesosphere-lower thermosphere regions using satellite and HF radar measurements [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10(7): 3397-3404.