

## 合肥上空中层大气密度和温度的激光雷达探测

邓 潘<sup>1,2,3</sup>, 张天舒<sup>1</sup>, 陈 卫<sup>1,2,3</sup>, 刘 洋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230036;  
3. 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 为研究中层大气分布情况, 采用自行研制的 532 nm 瑞利(Rayleigh)散射激光雷达, 对合肥地区(31.90°N, 117.170°E) 25~40 km 高度范围内的大气密度和温度廓线分布进行观测。将瑞利散射激光雷达所测结果与 NRLMSISE-00 大气模型数据进行对比, 以验证瑞利散射激光雷达性能及数据处理方法的可靠性。通过数据对比得出, 在 25~40 km 高度范围内, 瑞利散射激光雷达获得的大气密度值与 NRLMSISE-00 大气模型密度值的比值为 0.99~1.03; 瑞利散射激光雷达所测温度值与 NRLMSISE-00 大气模型数据的温度偏差均值约为 2.8 K, 其中 38 km 以下两者温度偏差约为 1.6 K。数据对比说明, 瑞利散射激光雷达观测值与 NRLMSISE-00 大气模型数据具有较一致的密度分布特征和温度分布特征, 瑞利散射激光雷达的观测结果能够较真实地反映合肥上空 25~40 km 高度范围内的大气密度和温度分布。

**关键词:** 激光雷达; 瑞利散射; 大气密度; 大气温度

**中图分类号:** P413.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0730003

## Lidar measurement for atmospheric density and temperature in middle atmosphere over Hefei

Deng Pan<sup>1,2,3</sup>, Zhang Tianshu<sup>1</sup>, Chen Wei<sup>1,2,3</sup>, Liu Yang<sup>1,2</sup>

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230036, China;  
3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China)

**Abstract:** In order to study the distributed situation of the middle atmosphere, a self-developed Rayleigh scattering lidar used to remote sensing in the altitude range 25–40 km was introduced, which was located at Hefei (31.90°N; 117.170°E), China. Rayleigh scattering lidar with 532 nm wavelength made the measurements of atmospheric density and temperature. The results obtained by Rayleigh scattering lidar were compared with the data provided by NRLMSISE-00 Atmosphere Model to prove the Rayleigh scattering lidar system performance and the reliability of the data processing method. Through comparison and analysis of the result data, it can be found that the density ratio of Rayleigh scattering lidar to NRLMSISE-00 Atmosphere Model is from 0.99 to 1.03, and the temperature biases between Rayleigh

收稿日期: 2016-11-04; 修订日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(41205119); 国家 863 计划(2014AA06A512)

作者简介: 邓潘(1981-), 女, 博士生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。Email: pdeng@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事环境遥感监测方面的研究。Email: jgliu@aiofm.ac.cn

scattering lidar and NRLMSISE-00 Atmosphere Model are about 2.8 K from 25 km to 40 km. Especially under the altitude 38 km, the temperature biases is about 1.6 K. These results indicate that atmospheric density and temperature profiles obtained by Rayleigh lidar show the coincident distribution with the data of NRLMSISE-00 Atmosphere Model over the altitudes of 25 km to 40 km, and the Rayleigh scattering lidar can represent the distribution of the atmospheric density and temperature between the altitude 25 km and 40 km over Hefei.

**Key words:** lidar; Rayleigh scattering; atmospheric density; atmospheric temperature

## 0 引言

中层大气是指高度介于 10~100 km 的大气层,其包括对流层(约 0~15 km)上部、平流层(约 15~50 km)、中间层(约 50~85 km)以及低热层(约 85 km 以上),其主体部分为平流层和中间层。中层大气比较稀薄,却占有非常巨大的体积,在其区域内存在复杂的光化和动力学过程,这些过程与人类的生存发展以及航天和军事活动密切相关。然而由于该层大气稀薄,高度距离较远,探测十分困难,因而对该层大气情况的了解及其作用的研究长期以来比较薄弱。由于中层大气的独特资源优势,西方各强国非常重视对中层大气环境特性的监测。因此,开展中层大气环境的特殊性研究对国内航空航天技术的发展具有十分重要的意义。

目前对中层大气主要的观测手段有探空火箭、探空气球、卫星观测和地基激光雷达等。探空火箭和高空探空气球的探空费用比较昂贵,探测次数有限,无法做到长期不间断监测;卫星探测空间分辨率较低,无法获得短期变化数据,且需地面定标;激光雷达由于波长短和光束指向性强,具有较高的探测灵敏度和空间分辨,能够进行长期连续观测,并能为卫星数据的定标提供较好的资料<sup>[1-3]</sup>。正是由于这一特点,使得激光雷达成为中层大气探测的一种重要技术手段。法国 A.Hauchcorne 研究组等自 1979 年以来对平流层和中间层温度进行了激光雷达长期系统的测量,其观测资料已表明北半球平流层至中间层在变冷,模式研究也发现了这一现象。世界气象组织 WMO 已经认可了瑞利散射激光雷达观测温度分布结果的可靠性<sup>[4-5]</sup>。国家自然科学基金委员会于 2006 年 4 月组织召开了“临近空间飞行器的发展趋势和重大基础科学问题研讨会”,中高层空间飞行器和环境问

题已得到国内相关部门和专家的高度重视。

文中介绍一台中层大气探测的瑞利散射激光雷达及其数据处理方法,对合肥地区 25~40 km 高度范围的大气密度和温度进行了观测,给出了瑞利激光雷达观测值与 NRLMSISE-00 大气模型数据比对的密度与温度廓线分布。

## 1 激光雷达系统

实验中所采用的 532 nm 瑞利散射激光雷达系统主要由激光发射、回波接收和数据采集及控制部分三大部分组成,系统结构如图 1 所示。

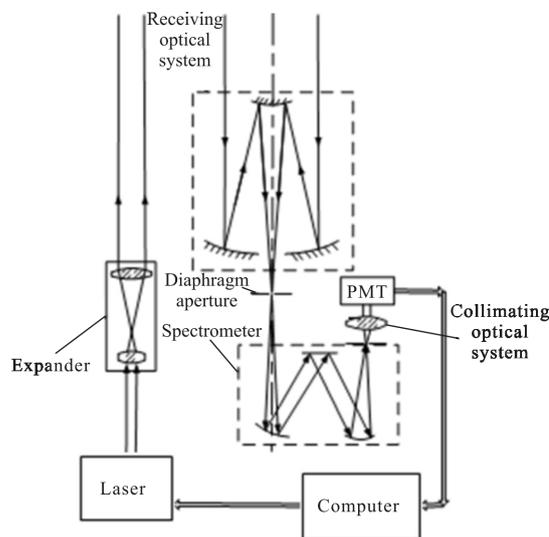


图 1 瑞利散射激光雷达系统结构图

Fig.1 Schematic setup of the Rayleigh scattering lidar

激光发射部分主要包括:532 nm 的 Nd:YAG 激光器、导光及光束调整装置。Nd:YAG 激光器输出水平激光束,入射至 45°反射镜后垂直出射至大气中,单脉冲能量达 400 mJ,重频为 10 Hz,扩束后发散角约为 0.3 mrad。回波接收部分包括 400 mm 卡塞格林

型接收望远镜、小孔光阑、光电倍增管(PMT)。接收望远镜收集大气后向散射光信号,小孔光阑用于限制回波接收系统视场角至 1.5 mrad。回波信号再经准直系统后入射至 PMT,由 PMT 将入射的大气后向散射光转化为电信号,并通过前置衰减片来减小光强。该 PMT 采用光子计数来记录大气后向散射的弱回波信号。为提高回波信号信噪比,PMT 配备制冷器降低热噪声和暗电流,并前置 1nm 带宽窄带干涉滤光片以抑制天空背景噪声。表 1 所示为该激光雷达系统主要技术参数。

表 1 瑞利散射激光雷达系统主要技术参数

Tab.1 Technical parameters of the Rayleigh lidar

Lidar system	Specification
Lasers	Nd:YAG
Wavelength/nm	532
Pulse energy/mJ	400
PRF/Hz	10
Divergence/mrad	0.3
Telescope type	Cassegrain
Telescope diameter/mm	400
Field of view/mrad	1.5

## 2 探测原理

由于 25~30 km 高度以上,大气气溶胶含量极微,一般可把这一高度范围的大气当作无气溶胶的清洁大气,大气后向散射回波主要是大气分子的瑞利散射信号<sup>[6-7]</sup>。激光雷达接收到的高度  $z$  处的瑞利散射光子数  $P(z)$  满足雷达方程,即<sup>[8-9]</sup>

$$P(z) = \frac{C}{z^2} \rho(z) \frac{R}{k} \sigma_{\text{Ray}} T^2(z) + n_{\text{SB}}(z) \quad (1)$$

式中: $P(z)$  为  $z$  高度上的大气回波光子数; $C$  为激光雷达系统常数; $\rho(z)$  为  $z$  高度上的大气密度; $R$  为普适气体常数; $k$  为玻耳兹曼常数; $\sigma_{\text{Ray}}$  为所用波长的瑞利分子后项散射截面; $T^2(z)$  为大气双程透过率; $n_{\text{SB}}(z)$  为背景噪声所引起的光子数。为计算  $\rho(z)$ , 方程写为:

$$\rho(z) = \frac{z^2 k}{CRT^2(z) \Delta Z \sigma_{\text{Ray}}} (P(z) - n_{\text{SB}}) \quad (2)$$

可以看出,在某一高度  $z$ , 大气分子的数密度与这一高度上的大气回波光子数成正比。如果希望得到大气密度的绝对值,必须精确确定雷达系统参数和大气的传输系数  $T(z)$ , 这些参数不仅难以测量,而且易受环境因素的影响,所以一般情况下,均采用信号归一的方法,对密度进行计算。首先从激光雷达方程中获得大气密度的相对分布,然后通过其他方法测量出某一高度的大气密度,利用该值进行定标,从而得到大气密度的绝对分布。

假设已知某一高度  $z_0$  上大气密度,可推算出该高度范围的大气密度廓线:

$$\rho(z) = \frac{z^2 \rho(z_0) (P(z) - n_{\text{SB}})}{z_0^2 (P(z_0) - n_{\text{SB}})} \quad (3)$$

式中: $\rho(z)$  为  $z$  高度上的大气密度, $\rho(z_0)$  为  $z_0$  高度上的大气密度, $z_0$  为参考高度; $P(z)$  为  $z$  高度上的大气回波光子数, $P(z_0)$  为  $z_0$  高度上的大气回波光子数;参考高度应尽可能选在高层且信噪比大于 5,参考高度处的大气密度可用卫星观测数据或大气模式值。这里假设大气透过率为常数,因为对于 532 nm 波长,从 25~40 km 大气透过率变化小于 0.5%,可近似取 1,由此带来的误差约为 1%~2%<sup>[10-12]</sup>。

通过对大气分子相对密度的测量可以获取温度廓线,进行温度反演基于两个假设:(1) 假定中层大气处于静力学平衡状态,并符合理想气体定律;(2) 假定大气中各种成分的比例是恒定的。在这两个假设前提下,通过相对密度廓线,可以求出中层大气的温度廓线。利用理想气体状态方程:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (4)$$

静力学方程:

$$dP = -\rho g dz \quad (5)$$

得出:

$$T(z) = \frac{M}{R} \frac{p(z)}{\rho(z)} \quad (6)$$

$$p(z) = p(z_R) + \int_{z_R}^z (-g(r) \rho(r)) dr \quad (7)$$

综合上述两式,得到高度  $z$  处的温度为:

$$T(z) = \frac{T(z_0) \rho(z_0)}{\rho(z)} + \frac{M}{R} \int_{z_0}^z \frac{g(r) \rho(r)}{\rho(z)} dr \quad (8)$$

式中: $T(z)$  为高度  $z$  处大气温度; $\rho(z)$  为高度  $z$  处大气密度; $p(z)$  为高度  $z$  处大气压强; $\rho(z_0)$  和  $T(z_0)$  分别是通过其他方式得到的参考高度  $z_0$  上的密度和温度,

一般取自大气模式数据值;  $M$  为大气平均分子量 ( $M=28.964 \text{ kg/kmol}$ );  $R$  为普适气体常数;  $g(r)$  为重力加速度。

### 3 结果及讨论

实验中, 该瑞利散射激光雷达在合肥市西郊 ( $31.90^\circ\text{N}; 117.170^\circ\text{E}$ ) 进行连续观测。瑞利散射激光雷达的典型回波信号如图 2 所示, 通过积累 4 000 个激光脉冲获得。为保证激光器的正常工作, 系统时间分辨率设为 15 min, 空间分辨率为 150 m, 采样最大高度可达 120 km, 60 km 以上基本为天空背景噪声。在数据处理中, 使用 60~90 km 之间大气回波均值作为背景噪声。考虑到回波信号因大气起伏而导致的波动, 对原始回波信号进行了移动平滑平均, 平滑窗宽度为 300 m。激光雷达的工作波长为 532 nm, 属可见光。受天气和背景噪声的限制, 一般在晴朗无云的夜晚进行观测。

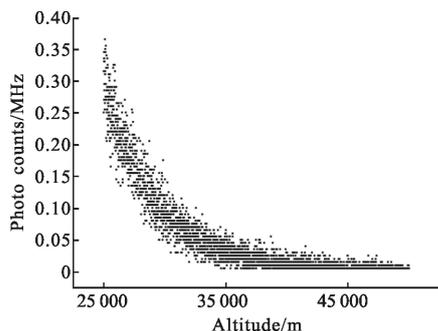


图 2 激光雷达瑞利散射回波信号

Fig.2 Rayleigh scattering echo signal of the lidar

激光雷达发射功率约为 400 mJ, 望远镜直径为 0.4 m, 探测的最大高度约 40 km, 如果使用更大发射功率的激光器和望远镜, 还可以提高探测的高度。图 3 为采用 2015 年 12 月 18 日凌晨 0:00 至 8:00 回波信号反演得到的大气分子密度廓线图。为验证该激光雷达性能和数据处理方法的可靠性, 其观测结果与 NRLMSISE-00 大气模型数据进行了对比分析。NRLMSISE-00 大气模型是 MSIS 大气模型的最新版本, 由美国海军研究实验室 (Navy Research Laboratory, NRL) 于 2000 年在 MSISE-90 模型的基础上发展而来, MSIS 是指质谱仪和非相干散射雷达, E 是指该模型从地面覆盖到逸散底层, 可见 NRLMSISE-00 模型主要是基于质谱仪和非相干散

射雷达的观测数据, 预测从地面到高度 1 000 km 的大气随时间和空间的变化情况。与 USSA-76 大气模型相比, NRLMSISE-00 大气模型的突出特点是可描述大气特性的时空变化<sup>[13]</sup>。文中 NRLMSISE-00 大气模型数据采用 2015 年 12 月月均值。

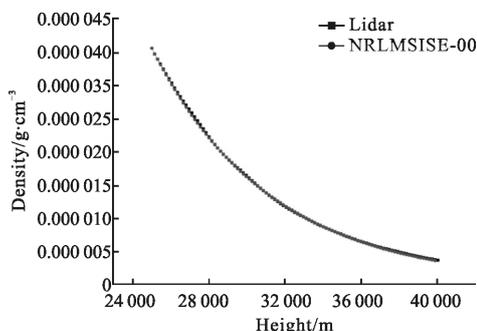


图 3 中层大气密度廓线分布图

Fig.3 Distribution schematic of middle atmospheric density profile

在反演过程中, 参考点的选取十分关键。首先由于向上积分会使误差累积, 所以参考点一般选取在较高海拔处, 参考点的参数可使用大气模式值或者卫星测量值。其次, 要考虑参考点处的信噪比, 参考点处的信噪比太低, 会直接影响大气参数的反演精度<sup>[10]</sup>。在实际反演过程中, 上述两者是相互矛盾的, 参考点选取的海拔高度越高, 其相对信噪比也就越低, 因此选择合适的参考点要兼顾二者。根据瑞利激光雷达的回波实际情况, 文中参考高度  $z_0$  选在 37 km 处, 该处信噪比大于 5, 参考密度和温度值取自于 NRLMSISE-00 大气模式的 2015 年 12 月平均值。

由于大气密度随高度增高呈指数减小分布, 因此将其表示为激光雷达观测值与大气模型值的比值。由图 4 可以看出, 25~40 km 高度范围大气密度激

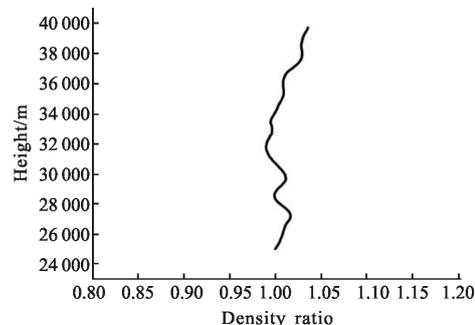


图 4 激光雷达测量值与 NRLMSISE-00 大气模型数据的密度比值

Fig.4 Density ratio profile of the lidar measurement value to NRLMSISE-00 atmospheric model data

光雷达实测值与 NRLMSISE-00 大气模型数据非常接近,其密度比值在 1 附近波动,比值范围为 0.99~1.03,38 km 以上比值偏离稍大。

由于激光雷达的高空间和时间分辨率特性,其非常适合中高层大气的观测和研究。为了更好地反映大气的波动情况,大气密度可用其扰动量来表示。将当晚观测的大气密度进行平均,并用指数函数来进行拟合,得到大气密度的背景值,扰动量为某一时刻大气密度与背景值的相对变化量。图 5 为 2015 年 12 月 18 日凌晨 0:00 至 8:00 的密度扰动序列,每条廓线的时间间隔为 30 min,从左至右按时间排列。从图 5 可见,26、28、32、36 km 处的斜线标示出了密度扰动相位的向下传播趋势。参考文献[11]中表明,大气密度扰动近似等于重力波扰动。如果对这些扰动信息进行滤波和谱分析,则可得到大气波动的垂直波长、振幅和相速度等参数。

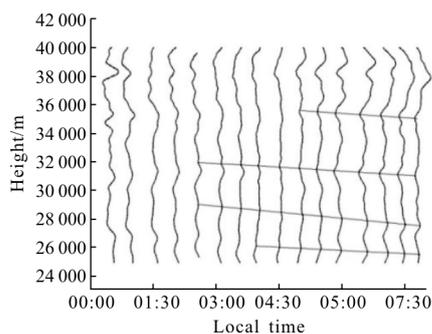


图 5 大气密度扰动序列图

Fig.5 Sequence of density disturbance

图 6 是 2015 年 12 月 18 日晚激光雷达观测的温度分布廓线,同时给出其与 NRLMSISE-00 大气模型数据的对比结果。激光雷达的观测时间为 00:04 LT~08:00 LT,大气温度是通过多个瑞利散射回波信号累加平均后反演得到的。将激光雷达测量所得的温度线性内插到与大气模式值同样的高度,计算二者温度的相对偏差。图 7 为激光雷达观测值与 NRLMSISE-00 大气模型数据对比的温度偏差图。通过分析比较,得出 25~40 km 高度范围的激光雷达反演温度值与 NRLMSISE-00 大气模型数据的温度误差均值约为 2.8 K,38 km 以下温度偏差约为 1.6 K。38 km 以上高度、温度偏差显著增大,温度偏差约达 10 K。分析认为由于分子瑞利散射信号随高度成指数衰减,随着探测高度增加,回波信号信噪比

降低,信号淹没在噪声中,从而远距离探测反演精度降低。此外,参考点的选取以及积分计算所使用的方法也对温度反演有所影响,在后续工作中可通过提高回波信噪比及对参考点选取和温度反演算法的改进优化来进一步提高反演精度。总的来说,激光雷达观测结果与 NRLMSISE-00 大气模型数据分布较为一致,激光雷达观测的温度基本上准确可靠,在一定程度上能够反映合肥上空中高层大气的实际状况。

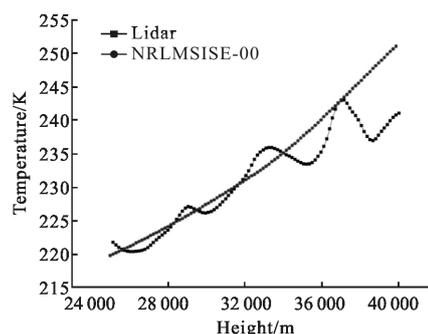


图 6 中层大气温度廓线分布图

Fig.6 Distribution schematic of middle atmospheric temperature profile

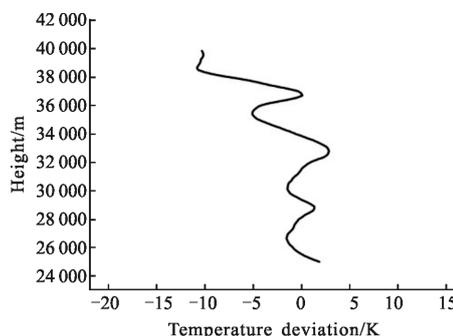


图 7 激光雷达测量值与 NRLMSISE-00 大气模型数据的相对偏差  
Fig.7 Temperature deviation profile of the lidar measurement value to NRLMSISE-00 model data

## 4 结论

实验表明,瑞利散射激光雷达能够得到平流层中上部 25~40 km 高度范围内大气密度和温度的分布情况,与 NRLMSISE-00 大气模型数据对比,表现了较好的一致性。激光雷达观测大气密度值与 NRLMSISE-00 大气模型数据的比值为 0.99~1.03。25~40 km 高度范围内,激光雷达观测大气温度值与 NRLMSISE-00 大气模型数据温度偏差约为 2.8 K,38 km 以下温度偏差约为 1.6 K。总的来说,激光雷达观测结果与 NRLMSISE-00 大气模型数据吻合较好,

能够反映合肥地区中层大气的实际状况。在后续工作中,可通过提高回波信号信噪比及对参考点选取和反演算法的改进优化,进一步提高测量精度及扩大探测高度范围。该瑞利激光雷达的长期系统观测将提供合肥地区中层大气密度和温度的分布特征,并用以研究中层大气参数变化情况,为建立国内中高层大气模式提供实测数据。

#### 参考文献:

- [1] Finger F G, Gelman M E, Wild J D, et al. Evaluation of NMC upper-stratospheric temperature analysis using rocket sonde and lidar data [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1993, 74(5): 789-799.
- [2] Liu Dong, Yang Yongying, Zhou Yudi, et al. High spectral resolution lidar for atmosphere remote sensing: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2535-2546. (in Chinese)  
刘东, 杨甬英, 周雨迪, 等. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2535-2546.
- [3] Mariche V V N, MatVienko G G, Tikhomiro V A A, et al. Evaluation of the capability of Lidar placed onboard an orbital platform to measure the atmospheric density profiles [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9292: 92925L.
- [4] Alain Hauchecorne, Marie-Lise Chanin. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 75 km [J]. *Geophysical Research Letters*, 1980, 7(8): 565-668.
- [5] Robert L McKenzie. A method of atmospheric density measurements during space shuttle entry using ultraviolet-laser Rayleigh scattering [Z]. US: NASA Technical Memorandum, 1988.
- [6] Chen W N, Tsao C C, Nee J B. Rayleigh lidar temperature measurements in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66: 39-49.
- [7] Dai Yongjiang. Laser and Infrared Sounds Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 271-272. (in Chinese)  
戴永江. 激光与红外探测原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 271-272.
- [8] Barnett J J, Corney M. Middle Atmospheric Reference Model Derived from Satellite Data [M]. US: International Council of Scientific Unions Middle Atmosphere Program, 1985, 16: 47-85.
- [9] Weitkamp C. Lidar Range-Resolve Optical Remote Sensing of the Atmosphere [M]. Germany: Springer Science and Business Media, 2005: 6-12.
- [10] Liu Xiaoqin. The Na-T-A lidar system and its observation of sodium density and atmospheric temperature [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)  
刘小勤. Na-T-A 激光雷达系统及钠层密度和大气温度探测研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2006.
- [11] Tang Lei, Wu Haibin, Sun Dongsong, et al. Analysis of system accuracy for Rayleigh backscattering Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3570-3576. (in Chinese)  
唐磊, 吴海滨, 孙东松, 等. 瑞利散射多普勒测风激光雷达系统误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3570-3576.
- [12] Wang Guocheng, Dou Xiankang, Xia Haiyun, et al. Performance of a Rayleigh Doppler lidar for middle atmosphere wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2351-2357.
- [13] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1468-1483.