532 nm 和 355 nm 瑞利激光雷达观测中层大气的数据对比分析

邓 潘[1,2,3],张天舒[1],刘建国[1],刘 洋[1,2],董云升[1],范广强[1]

(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. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘 要:分别采用 532 nm 和 355 nm 瑞利散射激光雷达对合肥地区 25~40 km 高度大气密度、压力和温度垂直分布进行了探测。532 nm 瑞利激光雷达系统采用 532 nm 波长 Nd:YAG 激光器及 400 mm 口径卡塞格林型望远镜。355 nm 瑞利激光雷达系统在 532 nm 瑞利激光雷达系统上进行改进,采用 355 nm 波长 Nd:YAG 激光器及 4 只 400 mm 口径卡塞格林型望远镜。通过实验对比得出,355 nm 激光雷达系统信噪比高于 532 nm 激光雷达系统约 6 倍。355 nm 激光雷达系统大气密度及压力探测值与当日气球探空数据比值波动小于 532 nm 激光雷达系统。355 nm 激光雷达系统探测大气温度与当日气球探空数据偏差均值约为-2.14 K,最大温度偏差约为 6 K, 532 nm 激光雷达系统探测大气温度与当日气球探空数据偏差均值约为-6.98 K,最大温度偏差约为 9 K。两台激光雷达对比实验说明,改进的 355 nm 激光雷达系统对中层大气密度、压力和温度探测精度要高于 532 nm 激光雷达系统, 改进的 355 nm 激光雷达系统探测性能优于 532 nm 激光雷达系统。

关键词:瑞利散射; 激光雷达; 大气密度; 大气压力; 大气温度

中图分类号:P413.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.S230001

Comparative analysis of the middle atmospheric parameters observed by 532 nm and 355 nm Rayleigh Lidar

Deng Pan[1,2,3], Zhang Tianshu[1], Liu Jianguo[1], Liu Yang[1,2], Dong Yunsheng[1], Fan Guangqiang[1]

(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: The middle atmospheric density, pressure and temperature structure was measured by 532 nm and 355 nm Rayleigh Scattering Lidar between the altitude 25 km and 40 km at Hefei (31.90°N; 117.170°E), respectively. 532 nm Rayleigh Scattering Lidar system adopted Nd:YAG laser of 532 nm and 400 mm Cassegrain telescope. 355 nm Rayleigh Scattering Lidar system which was improved on the basis of 532 nm Rayleigh Scattering Lidar system, employed Nd:YAG laser of 355 nm and four Cassegrain telescopes of 400 mm. According to experimental comparison, it could obtain that the SNR of 355 nm Rayleigh Scattering Lidar is more than 532 nm Rayleigh Scattering Lidar of about 6 times. The fluctuation of the density ratio and pressure ratio of 355 nm Rayleigh Scattering Lidar to Sounding Balloon are less than the fluctuation of 532 nm Rayleigh Scattering Lidar. The temperature biases

收稿日期:2016-08-24; **修订日期**:2016-09-27

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

between 355 nm Rayleigh Scattering Lidar and the sounding balloon of that day are about −2.14 K, and the maximum deviation is about 6 K. And the temperature biases between 532 nm Rayleigh Scattering Lidar and the sounding balloon of that day are about −6.98 K, and the maximum deviation is about 9 K. The results of comparative test for 355 nm Rayleigh Scattering Lidar and 532 nm Rayleigh Scattering Lidar have shown that the detection precision of 355 nm Rayleigh Scattering Lidar was higher than 532 nm Rayleigh Scattering Lidar, and the performance of 532 nm Rayleigh Lidar is better than 532 nm Rayleigh Lidar.

Key words: Rayleigh scattering; Lidar; atmospheric density; atmospheric pressure; atmospheric temperature

0 引 言

根据温度变化、离化程度及组分区别等特征,大气层按照高度分为对流层(约 0~15 km)、平流层(约 15~50 km)、中间层(约 50~85 km)和热层(约 85 km 以上)四个性质不同的层次。中层大气(middle atmosphere)是指高度介于 10~100 km 的大气层，其包括对流层上部、平流层、中间层以及低热层[1]。中层大气科学的发展对于人类保障空间活动和技术系统的安全具有特殊的重要性,因此,该领域受到众多空间物理学家和大气科学家的共同关注。

中层大气稀薄,却占有非常巨大的体积,中层大气同时受到对流层大气环流以及太阳活动的影响,对地气系统能量收支平衡、全球气候与环境变化有着重要的影响。如中层大气的辐射和吸收过程将产生辐射加热效应，碰撞及光化学反应等过程将产生化学加热,这些将影响中层大气层的能量平衡。而中层大气温度、气压和中性大气分子浓度是参与这些物理化学过程的主体。因此,掌握中层大气参数变化对于认知中层大气环境至关重要。由于中层大气过程的特殊性及其对来自上下的外强迫 (地球表层和低层大气、人类活动、太阳活动与高层大气变化)扰动的敏感性，中层大气领域依然是空间物理学家和大气物理学家研究的热点和难点[2-5]。

目前，中层大气探测方法有卫星遥感、探空气球、探空火箭和激光雷达等技术手段。探空火箭和探空气球的探空成本费用较高,火箭、气球探空站和探测资料比较有限,卫星遥感的数据虽然可覆盖全球,但其空间分辨率及数据精度相对较低。激光雷达是利用原子和分子散射原理来探测大气密度和温度等参数,由于波长较短,且激光光束的指向性较高,其具有很高的探测灵敏度和空间分辨率，其时空分辨率可分别达数分钟和数十米量级，其可根据大气现象研究的需要而进行时间空间分辨率的改变,可在夜间对中层大气进行连续不间断的观测。通常认为在 25~30 km 以上的大气中不含气溶胶，故散射信号均为瑞利散射信号。瑞利散射激光雷达就是以激光与大气分子的瑞利散射作为雷达回波对大气进行探测,因此,瑞利激光雷达能方便而有效地对中层大气进行探测。虽然瑞利散射激光雷达特别适用于对中层大气的遥感探测，但是由于大气分子的密度随高度的增加而迅速降低，这使得瑞利激光雷达接收到中高层激光雷达回波信号十分微弱，从而大大加大了使用瑞利激光雷达探测大气层的技术难度。

文中首先采用 532 nm 波长及 400 mm 口径卡塞格林型望远镜的激光雷达系统对合肥地区中层大气进行探测，为进一步提高系统探测性能，在 532 nm 激光雷达系统基础上进行改进,采用了 355 nm 波长激光器和 4×400 mm 阵列接收口径望远镜，改进的 355 nm 激光雷达系统对合肥地区中层大气进行了连续探测,通过对两台激光雷达系统测量数据的对比,进一步分析影响激光雷达探测性能的因素。

1 探测原理

激光雷达探测的基本原理是激光与气体分子或悬浮在大气中的微粒进行相互作用,系统接收作用后的激光雷达回波信号,通过分析回波信号反演出待测的大气参数。瑞利散射激光雷达适合于探测 25~30 km 以上高度大气密度和温度的分布。这主要

是因为 25~30 km 以上大气中气溶胶含量很低，其米散射信号相对于大气分子的瑞利散射信号而言，可以忽略不计，可近似认为 25~30 km 以上高度大气回波信号仅包括瑞利散射信号[6]。故通过激光雷达方程及瑞利散射方程，可得瑞利散射光子数 $P(z)$：

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

式中：$P(z)$为高度 z 上的大气回波光子数；C 为激光雷达系统常数；$\rho(z)$为高度 z 上的大气密度；σ_{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；$n_{SB}(z)$为背景噪声所引起的光子数；k 为波尔兹曼常数；R 为普适气体常数。

采用信号归一化方法，对密度进行计算。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：

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

式中：$\rho(z)$为 z 高度上的大气密度；z_0 为参考高度；$\rho(z_0)$为 z_0 高度上的大气密度；$P(z)$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。假设大气透过率为常数，近似取 1，由此带来的误差约为 1%~2%[7-8]。

温度反演过程中，假定中层大气处于静力学平衡状态，并符合理想气体定律；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和静力学方程：

$$\rho=\frac{pM}{RT} \tag{3}$$

$$\mathrm{d}p=-\rho g\mathrm{d}z \tag{4}$$

得出：

$$T(z)=\frac{M}{R}\frac{p(z)}{\rho(z)} \tag{5}$$

$$p(z)=p(z_R)+\int_{Z_R}^{Z}(-g(r)\rho(r))\mathrm{d}r \tag{6}$$

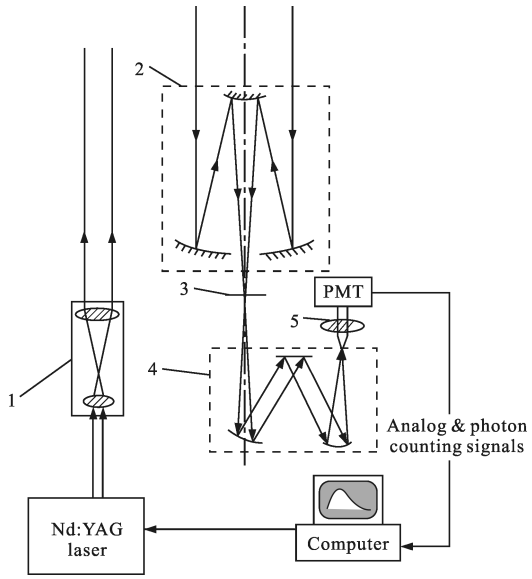
综合上述两式，得到高度 z 处的温度为：

$$T(z)=\frac{T(z_0)\rho(z_0)}{\rho(z)}+\frac{M}{R}\int_{Z}^{Z_0}\frac{g(r)\rho(r)}{\rho(z)}\mathrm{d}r \tag{7}$$

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或探空数据；M 为大气平均分子量(M= 28.964 kg/kmol)；R 为普适气体常数；$g(r)$为重力加速度。

2 系统结构

瑞利散射激光雷达系统主要由发射部分、接收部分和数据采集及控制部分三大部分组成。激光雷达系统结构如图 1 所示。



1.扩束镜 2.接收望远镜 3.小孔光阑 4.光谱仪 5.准直光学系统

1.expander 2.receiving telescope 3.diaphragm aperture 4.spectrometer 5.collimating optical system

图 1 激光雷达系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of Lidar

532 nm 激光雷达系统采用 532 nm 波长 Nd: YAG 激光器，单个脉冲能量可达 400 mJ，重复频率为 10 Hz，扩束后的发散角约为 0.3 mrad。采用直径 400 mm 的卡塞格林(Cassegrain)型望远镜。接收视场角约为 1.5 mrad。

为了提高原始回波数据的稳定性和激光雷达系统的回波信噪比，改善大气参数反演精度，在 532 nm 瑞利激光雷达系统基础上进行改进，采用紫外波段 355 nm 波长 Nd:YAG 激光器，单个脉冲能量约 260 mJ，重复频率为 10 Hz。接收部分采用 4 只400 mm 口径的卡塞格林式望远镜，其接收部分结构示意图如图 2 所示。

每个望远镜均可以单独三维调节指向，并使用四合一光纤束将回波信号耦合进光栅光谱滤光器。激光束发散角为 0.15 mrad。由于发射激光为 355 nm，

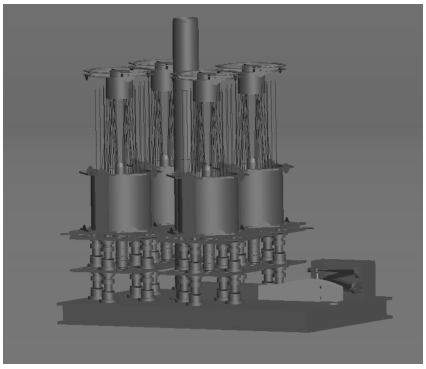


图 2 望远镜阵列结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of telescope array structure

并且光信号是通过光纤束耦合进入滤光器的,光束的数值孔径由原来的 0.1 变为 0.12, 光栅光谱滤光器也针对这些变化进行了重新设计。表 1 给出了 532 nm 和 355 nm 瑞利散射激光雷达系统的技术参数。

表 1 激光雷达系统主要技术参数

Tab.1 Technical parameters of Rayleigh Lidar

Lidar system	532 nm Lidar	355 nm Lidar
Laser	Nd:YAG	Nd:YAG
Wavelength/nm	532	355
Pulse energy/mJ	400	260
PRF/Hz	10	10
Divergence/mrad	0.3	0.15
Telescope type	Cassegrain	Cassegrain
Telescope diameter/mm	400	4×400

3 数据对比分析

实验中, 两台瑞利散射激光雷达先后安置在合肥市西郊(31.90°N;117.170°E)进行连续观测。受天气和背景噪声的限制,选择在晴朗无云的夜晚进行激光雷达大气观测。通过积累 4 000 个激光脉冲获得激光雷达回波信号。为保证激光器的正常工作,激光雷达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。

532 nm 激光雷达选用 2015 年 7 月 29 日凌晨 0 点至 6 点时间段的测量数据, 该时间段天气晴朗无云。对 532 nm 激光雷达系统进行改进,采用 355 nm 波长的 Nd:YAG 激光器及 4×400 mm 阵列接收望远镜,继续在原 532 nm 激光雷达测量地点对合肥地区中层大气进行观测。355 nm 激光雷达选用 2015 年 12 月 28 日凌晨 0 点至 6 点时间段的测量数据,该时间段天气晴朗无云。为比较两台激光雷达的测量性能,根据参考文献[9],对两台瑞利散射激光雷达的信噪比进行对比,图 3 为 532 nm 激光雷达和 355 nm 激光雷达的信噪比对比图。

从图 3 中可见,改进的 355 nm 激光雷达的信噪比约为 532 nm 激光雷达的 6 倍,改进的 355 nm 激光雷达系统信噪比得到较大程度的提高。

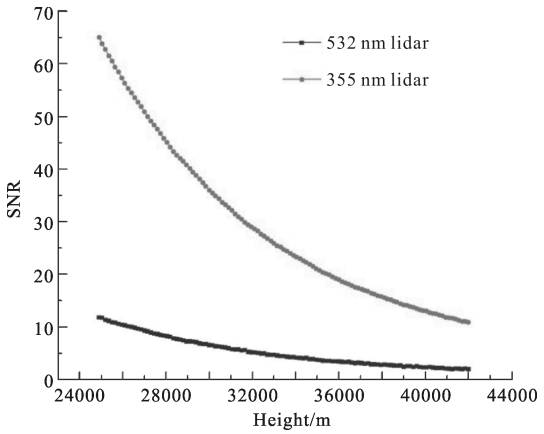


图 3 532 nm 激光雷达与 355 nm 激光雷达的信噪比对比图

Fig.3 Comparison of SNR based on 532 nm Lidar and 355 nm Lidar

为验证两台激光雷达系统性能和数据处理方法的可靠性, 将两台激光雷达观测结果分别与当日探空数据进行对比分析。为保证对比时间及高度距离的一致性,探空数据来自当日探空气球测量值,探空气球在距激光雷达观测站点约 100 m 处施放, 探测时间为早晨 7 点。2015 年 7 月 29 日探空气球最大探空高度为 35.5 km,2015 年 12 月 28 日探空气球最大探空高度为 37 km。在大气密度反演中,采用当日探空数据为参考值,参考高度选择在 35 km 处。图 4 为 2015 年 7 月 29 日 532 nm 激光雷达大气密度测量值与当日探空大气密度数据的对比图。图 5 为 2015 年 12 月 28 日 355 nm 激光雷达大气密度测量值与当日探空数据的对比图。

由于大气密度随高度增高呈指数减小分布,故采用激光雷达观测值与探空值的比值表示两者差异。图 6 给出了两台激光雷达测量值与其当日探空值的比值, 图中方块点线为 532 nm 激光雷达 2015 年 7 月 29 日的测量值与当日探空值的比值,圆点线

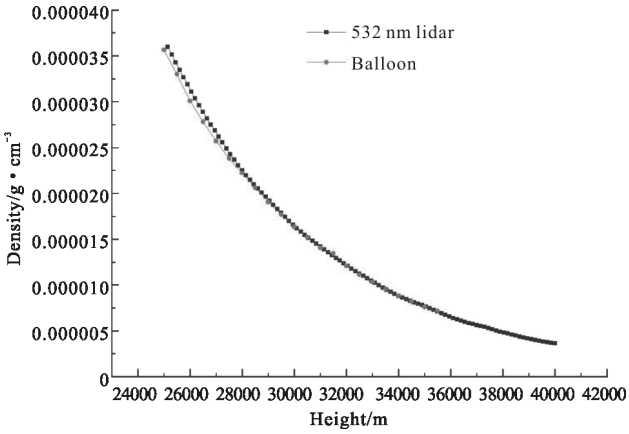


图 4 532 nm 激光雷达和球载探空测量的大气密度廓线分布图

Fig.4 Middle atmospheric density profile measured by 532 nm Lidar and sounding balloon

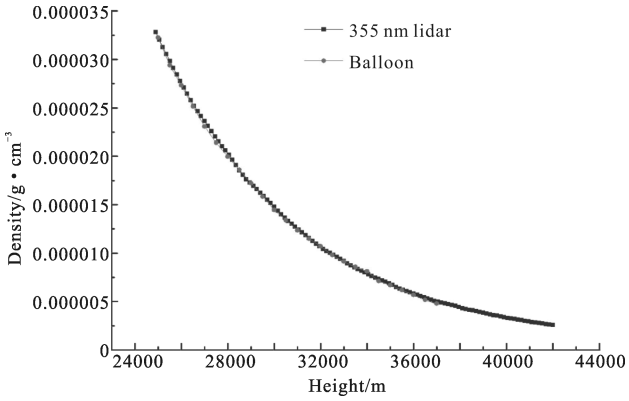


图 5 355 nm 激光雷达和球载探空测量的大气密度廓线分布图

Fig.5 Middle atmospheric density profile measured by 355 nm Lidar and sounding balloon

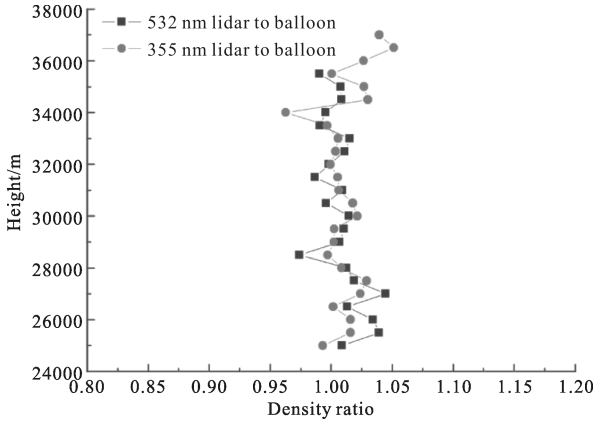


图 6 激光雷达与探空数据密度比值

Fig. 6 Density ratio profile from Lidar to sounding balloon

为 355 nm 激光雷达 2015 年 12 月 28 日测量值与当日探空值的比值。由图 6 可以看出,25~38 km 高度范围两台激光雷达实测大气密度值与探空数据非常接近,其密度比值在 1 附近波动,比值范围为 0.95~1.01,其中 532 nm 激光雷达与探空值比值波动稍大,532 nm 激光雷达探测稳定性稍差于 355 nm 激光雷达。

图 7 为 532 nm 激光雷达 2015 年 7 月 29 日大气压力测量值与探空大气压力值的对比图(1 mb=100 Pa)。图8 为 355 nm 激光雷达 2015 年 12 月 28 日大气压力测量值与当日探空大气压力值的对比图。进一步分析两台激光雷达与当日探空数据的比值,结果如图 9 所示。从图 9 中可见,两台激光雷达大气压力测量值与探空值比值在 0.97 附近波动,其中 532 nm 激光雷达比值波动要大于 355 nm 激光雷达比值。

图 10 为 532 nm 激光雷达 2015 年 7 月 29 日大气温度测量值与当日探空数据的对比图。图 11 为 355 nm 激光雷达 2015 年 12 月 28 日大气温度测量值与当日探空数据对比图。将激光雷达测量所得的

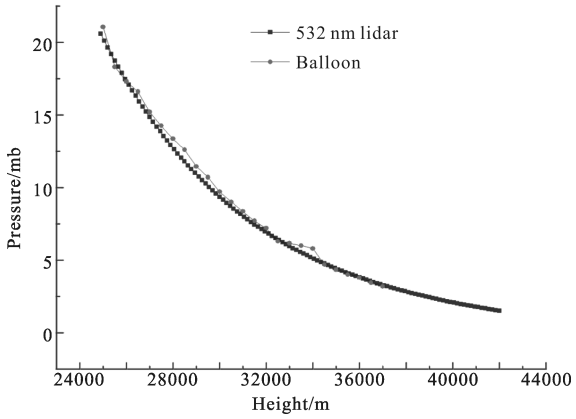


图 7 532 nm 激光雷达和球载探空测量的大气压力廓线分布图

Fig.7 Middle atmospheric press profile measured by 532 nm Lidar and sounding balloon

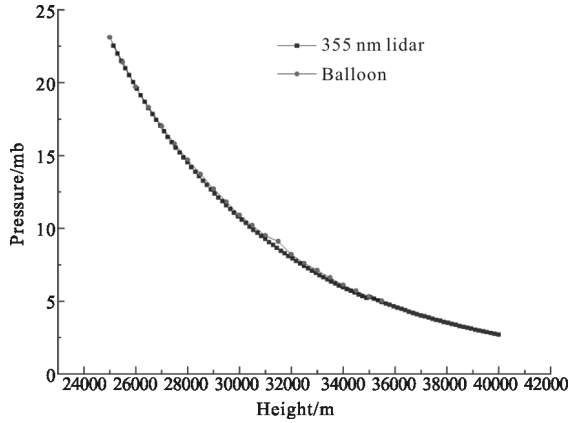


图 8 355 nm 激光雷达和球载探空测量的大气压力廓线分布图

Fig.8 Middle atmospheric pressure profile measured by 355 nm Lidar and sounding balloon

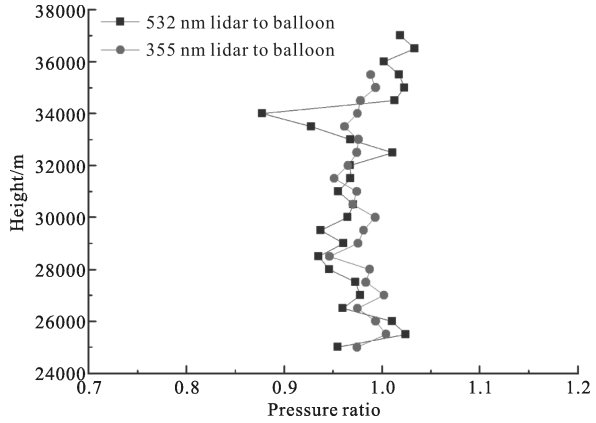


图 9 激光雷达测量值与探空数据比值

Fig.9 Pressure ratio profile from Lidar to sounding balloon

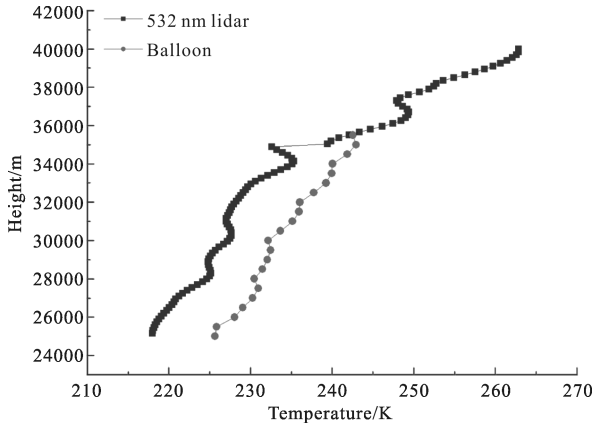


图 10 532 nm 激光雷达和球载探空测量的大气温度廓线分布图

Fig.10 Middle atmospheric temperature profile measured by 532 nm Lidar and sounding balloon

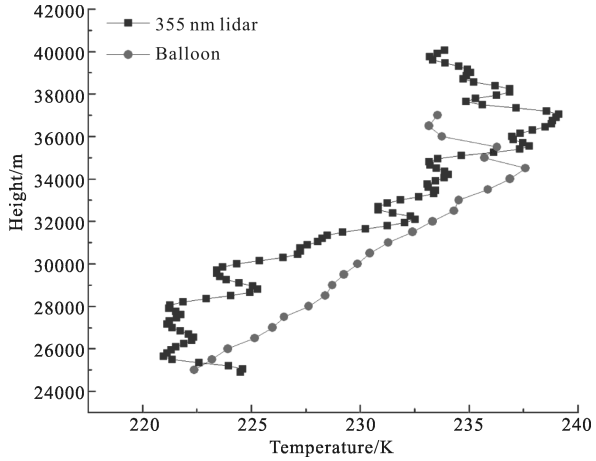


图 11 355 nm 激光雷达和球载探空测量的大气温度廓线分布图

Fig.11 Middle atmospheric temperature profile measured by 355 nm Lidar and sounding balloon

温度值线性内插到与探空数据同样的高度，计算二者温度的相对偏差。图 12 为两台激光雷达观测值与当日探空数据对比的温度偏差图。通过分析比较，在 25~35 km 高度范围 532 nm 激光雷达雷达反演温度值与探空数据的温度偏差均值为−6.98 K，其最大温度偏差为 9 K；355 nm 激光雷达反演温度值与探空数据的温度偏差均值为−2.14 K，其最大温度偏差为6 K。

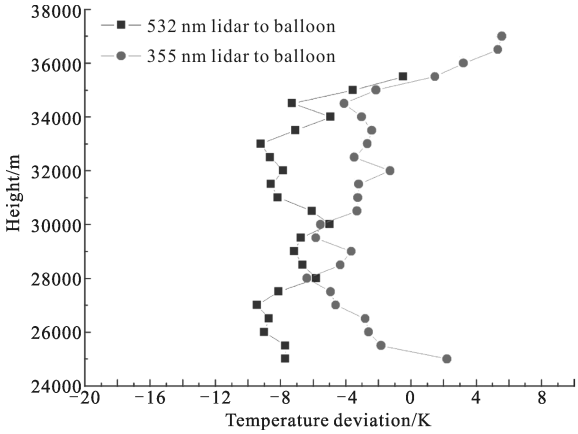


图 12 激光雷达测量值与探空数据的相对偏差

Fig.12 Temperature deviation profile of Lidar to sounding balloons

通过上述实验对比可见，改进的 355 nm 激光雷达系统的探测信噪比高于 532 nm 激光雷达系统。大气参数测量中，355 nm 激光雷达系统的大气密度及压力测量稳定性高于 532 nm 激光雷达系统，355 nm 激光雷达系统的大气温度测量精度高于 532 nm 激光雷达系统。通过对比分析可见，改进的 355 nm 激光雷达系统的中层大气探测性能要优于 532 nm 激光雷达系统。激光雷达系统性能得到提高，分析认为，一方面是因为发射部分采用紫外波段 355 nm Nd:YAG 激光器来代替 532 nm 波长激光器。由于 532 nm 波长位于臭氧吸收带(Chappius 带)内，其吸收截面约为 2.81×10^{-21} cm^2，且平流层(15~30 km 高度)中臭氧的浓度较高，因此臭氧对激光的吸收较大，对反演结果及廓线带来一定的影响。改用 355 nm 波长激光器后，355 nm 处臭氧对激光的吸收较弱，其吸收截面约为 1×10^{-23} cm^2，在一定程度上能够避开臭氧吸收以减少误差，臭氧的吸收带来影响减小。根据瑞利散射原理计算[10]，大气分子在 355 nm 波长上的后向散射截面是 532 nm 波长的 5.3 倍，考虑到更换激光器使单脉冲能量从 500 mJ 变化为 260 mJ，回波信号强度仍然能够得到提升。另一方面，355 nm 激光雷达系统的接收部分使用了 4×400 mm 口径的卡塞格林式望远镜阵列，相当于增大了望远镜接收口径，因此接收回波信号强度得到提高，反演精度得到改善。

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,从而更远距离探测反演精度降低。同时,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,一方面要从硬件设计上提高激光雷达的探测能力,可通过进一步对系统进行优化来提高回波信噪比,另一方面要在数据处理方面进行算法设计, 以此来提高信噪比和激光雷达数据的利用率,如对参考点选取和反演算法的改进优化。总的来说, 激光雷达观测结果与气球探空数据分布较为一致,激光雷达观测结果基本上准确可靠,在一定程度上能够反映合肥上空中高层大气的实际状况。

4 结 论

分别采用 532 nm 瑞利激光雷达系统和 355 nm 瑞利激光雷达系统对合肥地区中层大气密度、压力和温度进行了连续观测。532 nm 瑞利激光雷达系统采用 532 nm 波长 Nd: YAG 激光器和 400 mm 卡塞格林型望远镜。355 nm 瑞利激光雷达系统在 532 nm 瑞利激光雷达系统上进行改进, 采用 355 nm 波长 Nd: YAG 激光器和 4 只 400 mm 口径卡塞格林望远镜。实验表明,532 nm 瑞利散射激光雷达系统和 355 nm 激光雷达系统均能得到合肥平流层中上部 25~40 km 高度范围内大气密度、压力和温度的分布情况,对比发现 355 nm 激光雷达系统性能优于 532 nm 激光雷达系统。355 nm 激光雷达系统信噪比高于 532 nm 激光雷达系统,约为其 6 倍。为对比两台激光雷达的测量性能, 两台激光雷达系统分别与当日探空数据进行对比,355 nm 激光雷达系统探测大气密度及压力与当日气球探空数据比值波动小于 532 nm 激光雷达系统; 355 nm 激光雷达系统探测大气温度与当日气球探空数据偏差均值约为-2.14 K, 最大温度偏差约为 6 K, 532 nm 激光雷达系统探测大气温度与当日气球探空数据偏差均值约为-6.98 K,最大温度偏差约为 9 K。

通过两台激光雷达对比实验可见, 改进的355 nm 激光雷达系统探测性能优于 532 nm 激光雷达系统。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参数的分布特征,并用以研究中层大气参数变化情况,为建立我国中高层大气模式提供实测数据。

参考文献:

[1] Chen Hongbin. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research [J]. ***Advances in Earth Science***, 2009, 24(3): 229-241. (in Chinese)
陈洪滨. 中高层大气研究的空间探测[J]. 地球科学进展, 2009, 24(3): 229-241.

[2] Chandra H, Sharma S, Acharya Y B, et. al. A Rayleigh lidar study of the atmospheric temperature structure over Mt. Abu, India[J]. ***Journal of Indian Geophysical Union***, 2005, 9(4): 279-298.

[3] Lv Daren, Wang Yingjian. Recent advances of middle atmosphere in China [J]. ***Acta Geophysica Sinica***, 1994, 37 (S1): 74-84. (in Chinese)
吕达仁, 王英鉴. 中国中层大气研究的近期进展 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(S1): 74-84.

[4] Schoch A, Baumgarten G, Fiedler J. Polar middle atmosphere temperature climatology from Rayleigh lidar measurements at ALOMAR(69°N)[J]. ***Ann Geophys***, 2008, 26: 1681-1698.

[5] Argall P S, Sica R J. A comparison of Rayleigh and sodium lidar temperature climatologies[J]. ***Ann Geophys***, 2007, 25: 27-35.

[6] Thierry L, Philippe K, She C Y, et al. Temperature climatology of the middle atmosphere from long-term lidar measurement at middle and low latitudes [J]. ***Journal of Geophysical Research***, 1998, 103 (D14): 17191-17204. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 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.

[9] Deng Pan, Zhang Tianshu, Chen Wei, et al. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(S1): S130003-1- S130003-6. (in Chinese)

[10] Liou Kuonan. An Introduction To Atmospheric Radiation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 91-99. (in Chinese)