

文章编号: 1001-4322(2006)12-1944-05

用激光雷达探测合肥高空钠层的变化*

刘小勤¹, 胡顺星¹, 李 琛¹, 胡欢陵¹, 张寅超¹, 薛向辉²

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026)

摘 要: 介绍了自行设计的钠共振荧光激光雷达系统, 并对钠层密度、钠层柱密度、中心高度及均方根宽度进行了计算和分析。计算结果表明, 从 2005 年 12 月到 2006 年 3 月合肥上空钠层变化显著, 钠层柱密度从 12 月平均值 $5.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 变化到 3 月平均值 $2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 下降了 50% 以上。均方根宽度也下降, 中心高度略有波动。合肥钠层的变化趋势与中纬度其它地区具有可比性。

关键词: 激光雷达; 共振荧光; 钠密度; 柱密度

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

中高层大气或中间层是复杂光化学和动力学相互作用的区域, 是火箭、导弹和高频及卫星通讯电波的通过区, 对其探测与研究对国防和高科技应用有重要意义。同时对这段区域的探测衔接和弥补了地面探测和太空探测之间空缺。位于大约 80~110 km 高空的中间层顶附近, 存在一稳定的钠原子层, 来源于流星在大气中的燃烧熔化。由于金属钠原子具有较大的共振荧光散射截面、较大的粒子密度和适合的共振荧光波长, 有利于共振荧光激光雷达探测, 是中高层大气波动的良好示踪物。利用钠原子共振荧光激光雷达, 不仅能探测和研究钠层本身的特性, 还可以通过钠原子的示踪作用获得研究中间层项和低热层的大气化学和动力学的相关信息。因此钠共振荧光激光雷达不断在地球不同地区建立, 用于对高层大气的观测和研究^[1-5]。

在 2005 年底, 一台以探测高空钠层为主的激光雷达建成于合肥市中国科技大学(31.9°N, 117.17°E), 由中国科学院安徽光学精密机械研究所和中国科学技术大学共同研制。本文将介绍探测钠层的钠共振荧光激光雷达系统及探测原理, 并对测量得到的实验数据进行了计算和分析。

1 钠荧光激光雷达结构

本激光雷达从整体上可分为激光发射、光学接收和信号检测 3 部分组成, 系统结构如图 1 所示。

激光发射部分由 Nd:YAG 激光器、染料激光器、激光光束导向平台以及波长定标部分组成。激光发射部分的主要部件是激光器。本激光雷达使用由 Nd:YAG 激光器泵浦染料激光器, 其泵浦激光波长 532 nm, 脉冲能量 550 mJ, 染料激光波长 589 nm, 脉冲可达激光能量 77 mJ。激光波长经波长定标被调到 589 nm 的钠原子 D 吸收光谱线上。桔黄色激光经过激光光束导向平台垂直发射到天空。

激光雷达接收部分主要有接收望远镜、导光单元、衰减片和干涉滤光片等组成。卡塞格林式接收望远镜口径达 1 m, 用来收集激光的后向散射光。在接收望远镜的焦平面处安装了可调小孔光阑来限制望远镜的视场范围以减小天空的背景光^[6], 不同口径的小孔光阑可以使望远镜的接收视场角在 0.2~2 mrad 范围内可变。后向散射回波信号由接收望远镜收集, 经小孔光阑再经准直镜将散射光导入光电倍增管靶面。带宽 1 nm 的滤光片及衰减片置于光电倍增管前。

信号探测系统主要是用来对激光雷达接收到的大气后向散射光进行光电转换和放大, 由光电倍增管、前置

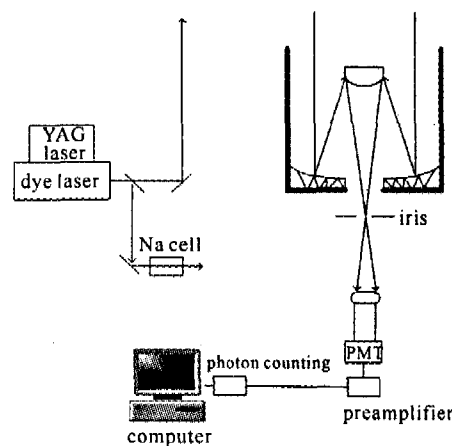


Fig. 1 Schematic diagram of Na fluorescence lidar
图 1 钠荧光激光雷达原理示意图

* 收稿日期: 2006-06-07; 修订日期: 2006-12-04

作者简介: 刘小勤(1967—), 女, 博士, 从事激光雷达及计算机应用研究; xqliu@aiofm.ac.cn.

脉冲放大器、多通道光子计数卡等组成。选用低噪声光电倍增管 9817QB 并配有制冷管，一般工作在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。整个测量过程在计算机控制下完成。

2 激光雷达原理和数据处理方法

共振荧光激光雷达对高空金属层的探测主要是接收金属原子因受激而产生的荧光。钠原子在波长 589 nm 附近有 D 吸收光谱线(即共振散射谱线),若激光波长调谐在 D 谱线上,钠原子在激光照射下将产生共振散射。由于共振散射光强往往比分子 Rayleigh 散射光强大好几个数量级,根据这一特性探测高空 90 km 中间层顶附近的钠原子浓度廓线^[1]。

钠层共振荧光激光雷达的雷达方程可写为

$$P_{\text{Na}}(R) = \frac{K}{R^2} \sigma_{\text{Na}} N_{\text{Na}}(R) T^2(R) \quad (1)$$

式中: σ_{Na} 为钠原子的共振后向散射微分截面; $N_{\text{Na}}(R)$ 为钠原子数密度,单位: cm^{-3} ; K 为雷达系统常数; R 为高度; $T(R)$ 为大气传输透过率。

为求得钠层原子密度的绝对值及其随高度的分布,较简单的做法是用大约 30 km 的大气分子 Rayleigh 散射信号对钠层原子的共振荧光信号进行归一化处理,消去雷达方程中的仪器常数 K 和低层大气的衰减项。在 30~50 km 高度范围选一高度为 R^* (归一化高度),则有

$$N_{\text{Na}}(R) = \frac{P_{\text{Na}}(R)R^2}{P_m(R)R^{*2}} \frac{\sigma_m N_m(R^*)}{\sigma_{\text{Na}}} \quad (2)$$

式中: $\sigma_m, \sigma_{\text{Na}}$ 可由计算得到; $N_m(R^*)$ 可从标准大气模式或探空实测数据得到。高层大气的大气消光系数很小,可以忽略不计。钠层原子密度绝对值的分布就可从钠层回波信号与归一化高度处的 Rayleigh 回波信号之比求得。

钠荧光激光雷达探测钠密度的精度主要与大气分子密度参考值的不确定性、散射截面的不确定性和回波信号起伏引起的统计误差等有关。归一化高度处使用大气模式分子数密度值所带来的误差不大于 3%。由散射截面(包括大气分子后项散射截面和钠原子共振荧光后项散射截面)所带来的不确定性,通过计算表明不会大于 5%。钠密度反演的主要误差来源是统计误差大约 10%~20%。图 3 中垂直廓线中所标的误差棒表示统计误差。统计误差可以通过累计更多的激光脉冲回波和降低距离分辨率来降低。

大量的统计分析显示,背景钠层近似于高斯分布。可以用高斯分布较好地模拟钠层的密度剖面结构

$$n_s(z) = \frac{C_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (3)$$

式中: $n_s(z)$ 表示 z 高度上的钠层密度; C_s 为柱密度; z_s 为质心高度; σ_s 为均方根宽度(RMS)。钠层的变化和大气对钠层短期的动力学和化学影响都需要通过钠层的柱密度、质心高度和均方根宽度这几个参量来描述^[1]。

3 结果分析与讨论

本激光雷达建成后,从 2005 年 12 月 14 日开始对高空钠层进行了 4 个月的试验探测。这是第一台用于探测合肥(31.9°S,117.17°E)高空钠层的激光雷达。图 2 是 2005 年 12 月 16 日的几组(约 4 min 一组)测量回波数据,每组回波信号的时间约为 4 min,高度分辨率约为 75 m,为了方便,把每组信号向上平移 50 个单位。该回波信号主要有两部分组成: 20~50 km 段为大气分子 Rayleigh 散射信号; 80~105 km 段为钠层的共振荧光回波信号。

图 3 中为合肥地区钠层密度在 2005 年 12 月份和 2006 年 3 月份的平均值,从图中可以看到 12 月份和 3 月份钠密度最大的高度比较接近,但 12 月份的钠柱密度和均方根宽度明显要高于 3 月份。

经过国内外同行多年的观测和分析证明钠层有很明显的年变化特征^[3,7-8]。在我们测量的 4 个月中也能清楚地看到钠层明显的季节变化。本文将月平均数值与世界上探测得到的中纬度地区 2005 年 12 月~2006 年 3 月测量平均值进行比较和分析。在表 1 中列出了对本台激光雷达近期观测得到数据进行计算分析得到的钠密度总量,中心高度及均方根宽度数值。作为比较,在表 2 中列出世界上中纬度一些地区 2005 年 12 月~2006 年 3 月测量数值。

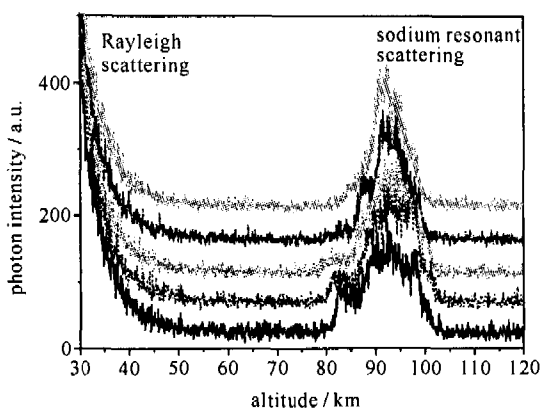


Fig. 2 Return signal of Na fluorescence lidar
图 2 钠共振荧光激光雷达的回波信号

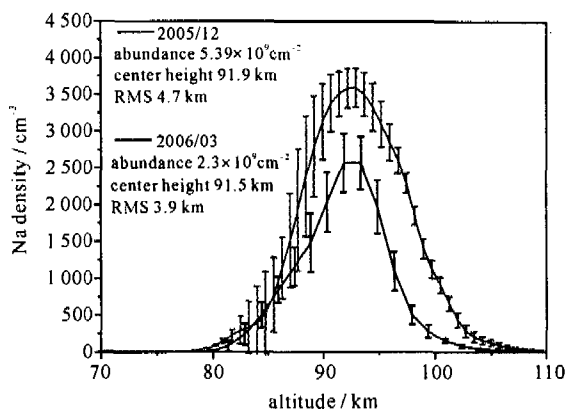


Fig. 3 Monthly average parameters of sodium layer at Dec. 2005 and Mar. 2006 at Hefei
图 3 合肥钠层 2005 年 12 月和 2006 年 3 月平均参数

表 1 合肥地区 2005 年 12 月~2006 年 3 月钠层月平均结构参数分布特征

Table 1 Monthly structure parameters of sodium layer between Dec. 2005 to Mar. 2006 at Hefei

area	geographic location	month	column abundance/ 10^8 cm^{-2}	centroid height/km	RMS width/km
Hefei	31.9°N, 117.17°W	Dec. 2005	5.39	91.96	4.70
		Jan. 2006	4.98	92.47	4.55
		Feb. 2006	2.84	92.03	4.21
		Mar. 2006	2.40	91.50	3.90

表 2 世界上中纬度一些地区 2005 年 12 月~2006 年 3 月钠层月平均结构参数^[2-4,6]

Table 2 Monthly structure parameters of sodium layer between Dec. 2005 to Mar. 2006 in the mid-latitude area

area	geographic location	month	column abundance/ 10^8 cm^{-2}	centroid height/km	RMS width/km
Sao Jose dos Campos	23°S, 46°W	Mar. 2006	2.1	91.0~92.0	
Urbana, Illinois	40°N, 88°W	Dec. 2005	4.5~5.3	91.8~91.3	5.5~5.3
		Jan. 2006	4.9~4.3	91.3~91.3	5.3~5.5
		Feb. 2006	4.3~3.1	91.4~91.8	5.5~4.5
		Mar. 2006	3.1~2.7	91.8~92.0	4.4~4.5
Hachioji, Tokyo	35.6°N, 139.4°E	Dec. 2005	1.0~3.0		4.5~6.0
		Jan. 2006	1.5~5.1		4.5~7.0
		Feb. 2006	1.0~2.6		4.1~5.9
		Mar. 2006	0.8~1.9		4.2~5.5
Illinis, Starfire Optic Range, New Mexico	35°N, 105°W	Dec. 2005	9.0~8.0	91.0~91.6	4.90~4.70
		Jan. 2006	8.0~6.0	91.5~92.2	4.75~4.25
		Feb. 2006	6.0~4.7	92.2~92.4	4.25~4.00
		Mar. 2006	5.0~4.0	92.4~92.2	4.00~4.10

在表 1~2 中,合肥地区 2005 年 12 月~2006 年 3 月钠层的柱密度在由高到低变化,特别是从 2005 年 12 月到 2006 年 2 月迅速减小。钠层柱密度的变化量与 Illinis 一致;Urbana Illinois 在 12 月到 3 月间也在由高到低变化,但变化不没有合肥地区显著。合肥地区 2005 年 12 月~2006 年 3 月钠层的柱密度总量在 $(2\sim5) \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 之间,与 Urbana Illinois 相当,Illinis 则明显大很多,而 Tokyo 钠密度值偏小。

钠层的中心高度从数值上看,合肥钠层 2005 年 12 月到 2006 年 3 月中心高度大约在 91.0~92.5 km 与中纬度其它地区的相关报道一致。从月变化看经历了从小到大再减小的变化,这种变化与 Illinis 和 Urbana Illinois 的中心高度变化一致。这说明合肥钠层钠层的中心高度变化体现很明显的季节波动。

再分析钠层的均方根宽度,合肥钠层这几个月无论数值大小变化还是数值范围都与 Illinis 吻合。均方根宽度数值范围在 4~5 km 之间, Tokyo 均方根宽度也在此范围内,而 Urbana Illinois 则略大。合肥钠层均方根宽度从 2005 年 12 月到 2006 年 3 月逐渐变小,Urbana Illinois 地区也有类似的变化。

本雷达对钠层的观测都在晴朗的夜晚进行,钠层的夜变化在观测的大多数天呈现基本相似的变化规律。图 4 为一典型测量结果。

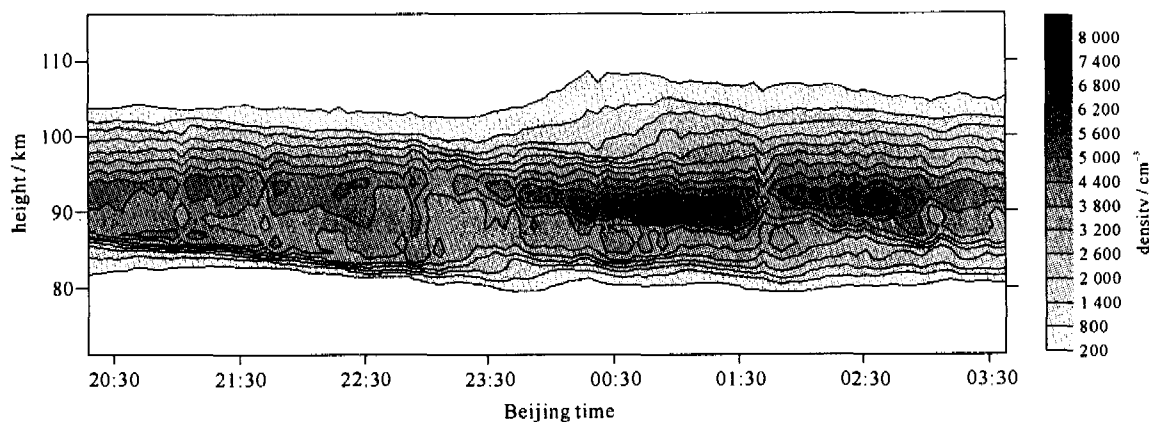


Fig. 4 Contour of the nocturnal variations of sodium density at Hefei on Dec. 22, 2005

图 4 合肥 2005 年 12 月 22 日钠层夜变化

从图 4 可以看出钠密度夜晚较次日黎明明显增大,在夜晚钠层的上半部分向上拓展,而下半部分梯度增大。钠层密度的峰值整晚呈下降趋势,峰值最小在 23 点左右,在 1 点左右有一个最大峰值,由于没有测量到黎明(文献资料报道钠层峰值出现在黎明),所以无法确定最大峰值位置。图 5 统计了钠层夜变化中的钠层柱密度、中心高度以及均方根宽度的夜间变化。

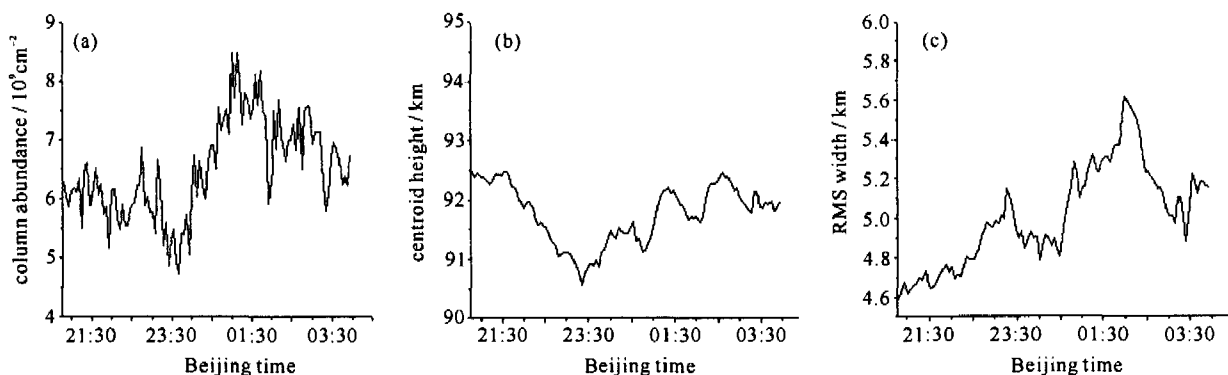


Fig. 5 Nocturnal variations of the sodium layer structure parameters at Hefei on Dec. 22, 2005

图 5 2005 年 12 月 22 日钠层结构参数的夜间变化

从图 5 中可以看到钠层柱密度先减弱到最小值后开始明显增强。钠层均方根宽度 22 点后变化与钠层柱密度变化相似,有一定波动,但总体趋势是上升。图 5(c)钠层中心高度呈现先下降后上升的趋势,最低点出现在接近午夜,中心高度的变化幅度大约为 1 km。地区钠层夜变化有规律周期性的变化很可能是受高层大气中的潮汐波影响所致,潮汐动力学、光离化和复合过程是钠层夜变化的主要因素。

4 结论

本文介绍了一台钠共振荧光激光雷达系统,分析了数据处理方法及误差来源。对合肥上空钠层进行了将近四个月的探测,通过对钠层密度、钠层柱密度、中心高度及均方根宽度的计算,并与中纬度其它地区进行对比分析,得出合肥钠层的季节变化与中纬度其它地区具有可比性。2005 年 12 月到 2006 年 3 月合肥上空钠层变化显著,平均钠层柱密度从 $5.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 变化到 $2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$,下降了 50% 以上。均方根宽度也在下降,中心高度略有波动。合肥钠层的夜变化规律明显,由大到小再变大,整晚钠层柱密度变化量大于 100%。从数据分析结果表明本激光雷达测量数据及处理方法是合理可靠的。利用本台激光雷达对合肥钠层进行长期探测,可以为研究中间层大气变化提供实测资料。

参考文献:

- [1] Gardner C S. Sodium resonance fluorescence lidar applications in atmospheric science and astronomy[J]. *Proc of IEEE*, 1989, 77(33):408-418.
- [2] Rithter E S, Rowlett J R, Gardner C S, et al. Lidar observation of the mesospheric sodium layer over Urbana, Illinois[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1981, 43(4):327-337.

- [3] Clemesha B R, Simonich D M, Takashashi H, et al. The annual variation of the high of the atmospheric sodium layer at 23°S. Possible evidence for convective transport[J]. *J Geophys Res*, 1992, **97**,5981-5985.
- [4] Clemesha B R, Simonich D M, Batista P P. Lidar observations of atmospheric sodium at an equatorial location[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, **60**,1773-1778.
- [5] Fiorani L, Armenante M, Capobianco R. Self-aligning lidar for the continuous monitoring of the atmosphere[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(21), 4758-4764.
- [6] 胡顺星,胡欢陵,吴永华,等.三波长双差分激光雷达测量对流层臭氧的实验研究[J].强激光与粒子束,1999,11(5),583-587.(Hu S X, Hu H L, Wu Y H, et al. Experimental studies of dual dial method for tropospheric ozone measurements. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5),583-587)
- [7] Gardner C S. Performance capabilities of middle-atmosphere temperature lidars, comparison of Na, Fe, K, Ca and Rayleigh systems[J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(25),4941-4956.
- [8] 胡雄, Gardner C, Liu A. 新墨西哥州 SOR 中间层钠层结构的季节和夜间变化[J].地球物理学, 2003, **46**(3),304-308.(Hu X, Gardener C, Liu A. Seasonal and nocturnal variations of the mesospheric sodium layer at Starfire Optical Range New Mexico. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, **46**(3),304-308)
- [9] 李洪均, 龚顺生, 郑文钢, 等. 中国武汉上空钠层分布的实验观测与理论模拟[J]. 空间科学学报, 1999, **19**(1),54-60.(Li H J, Gong S S, Zheng W G, et al. The observation and theoretic simulation of the sodium layer over Wuhan. *Chinese Journal of Space Science*, 1999, **19**(1),54-60)

Atmospheric sodium measurement at Hefei by lidar

LIU Xiao-qin¹, HU Shun-xing¹, LI Chen¹, HU Huan-ling¹, ZHANG Yin-chao¹, XUE Xiang-hui²

(1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China;*

2. *School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*

Abstract: Sodium resonance fluorescence lidar was used to detect sodium layer at Hefei. The configuration of sodium resonance fluorescence lidar was introduced. The measurement data have been retrieved and analyzed. The results show that the density of sodium varied much during Dec. 2005 to Mar. 2006; The column abundance of sodium layer changed from $5.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ to $2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, reduced almost 50%; The mean RMS width also declined, and the centroid height of sodium layer had small fluctuation. The variation trend of sodium layer at Hefei is similar to those in the other mid-latitude places (such as Illinois, Tokyo) in the world.

Key words: Lidar; Resonance fluorescence; Sodium density; Column abundance