

合肥上空钠层夜间激光雷达观测的初步研究*

陈廷娣, 薛向辉, 窦贤康

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要:介绍了中国科学技术大学的米-瑞利-钠荧光双波长激光雷达系统,其双波长发射和三通道探测技术使得该激光雷达系统能够对近地面到 110 km 高度范围内的多种物理量——气溶胶、大气温度和密度、钠层密度进行探测. 利用该激光雷达系统近一年的钠层密度观测数据,分析了合肥地区(31.87°N, 117.23°E)钠层的主要形态、夜间变化、季节变化特点. 结果显示,合肥钠层柱密度最小值为 $1.126 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 出现在 6 月份;最大值为 $6.014 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 出现在 12 月份;柱密度在夏季表现出相当宽广的极小值,质心高度没有明显的季节变化,而 RMS 宽度则呈准半年变化.

关键词:激光雷达;钠层密度;柱密度;质心高度;RMS 宽度

中图分类号:P407.5 文献标识码:A

Lidar studies of the nighttime sodium layer over Hefei, China

CHEN Ting-di, XUE Xiang-hui, DOU Xian-kang

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In Dec. 2005, a Mie-Rayleigh-Sodium fluorescence lidar system was construct at USTC, Hefei, China (31.87°N, 117.23°E) for measurements at altitudes between ground level and 110 km, i. e., aerosol extinction (ground level to 30 km), atmospheric (25~70 km) temperatures, and sodium (80~110 km) density. In the past one year after the lidar was set up, routine observations of sodium layer over Hefei were carried on. The characteristics of the shape, nocturnal variations and seasonal variations of sodium layer were obtained. The results show that sodium abundance reaches maximum value $6.014 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ in December, approximately 5 times larger than the June minimum value $1.126 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$. The abundance shows rather broader minimum values throughout the summer months, the centroid height has no evident seasonal variations, but the RMS width exhibits semi-annual variations.

Key words: lidar; sodium density; column abundance; centroid height; RMS width

0 引言

在日地空间环境中,中高层大气是与人类生存环境关系极为密切的层次,对它的研究在日地空间物理

研究中占有特殊地位. 作为最靠近对流层大气的空间物理层次,中高层大气不仅受到太阳活动的影响,也受到地球天气、气候的影响. 国际日地物理委员会在一系列已经结束的国际计划基础上,从 2004 年开始

* 收稿日期:2007-06-01;修回日期:2007-06-15

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向性项目(kzcx2-yw-123),武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室空间物理基础研究基金(L06-3),中国科学院大气物理研究所“联合创新青年学者计划”(IAP07307)资助.

作者简介:陈廷娣,女,1980年生,博士生.研究方向:激光雷达技术及数据分析,降雨反演算法. E-mail: tdchen@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:薛向辉,博士. E-mail: xuexh@mail.ustc.edu.cn; Tel: 0551-3601396

启动“日地系统天气和气候(Climatology and Weather of the Sun-Earth System, CAWSES)”计划^[1],关于大气内部的耦合过程研究成为其核心研究内容之一。

对于中高层大气的研究,观测起着十分重要的作用。激光雷达由于其很高的时空分辨率,成为研究中高层大气运动主要手段。特别在 80~110 km 高度区域,存在一个由大量金属原子和离子形成的金属层,其中的金属原子如钠原子、铁原子、钾原子、钙原子等能够吸收特定波长的光子发生荧光共振,可以利用激光雷达对它们进行探测,从而反映出大气动力学过程在该高度上的传播规律。金属钠原子的荧光共振截面较大,并且有较高的密度和最合适的荧光波长,因而 Bowman 等人^[2]于 1969 年最先实现激光雷达对钠层的探测。此后许多学者都展开了对钠层相应的观测和研究^[3,4,5]。激光雷达的广泛使用为研究中高层大气变化提供了丰富的实测资料。

本文主要介绍了中国科学技术大学新建成的米-瑞利-钠荧光双波长激光雷达系统,并利用其积累的观测数据分析合肥地区(31.87°N, 117.23°E)高空钠层的典型特征。

1 中国科学技术大学激光雷达系统

中国科学技术大学于 2004 年底起在“211 工程”经费的支持下,通过与安徽光学精密机械研究所合作,建成了一部米-瑞利-钠荧光激光雷达。本激光雷达主要由激光发射单元、光学接收单元和信号检测单元三部分组成,主要技术参数列在表 1 中。

表 1 中国科学技术大学激光雷达主要参数

Tab. 1 USTC Lidar parameters

发射激光器	Nd:YAG	Dye Laser
波长/nm	532	589
脉冲能量/mJ	550	50(typ.)
线宽/cm ⁻¹	1	0.05
脉冲宽度/ns	6	6
重复频率/Hz	20	20
光束发散角/mrad	0.5	0.5
接收望远镜		
类型	Cassegrain	
孔径/mm	1 000	
视场角/mrad	0.2~2	
滤光片		
波长/nm	532	589.3(589.0) ^a
带宽/nm	1.0	1.0(0.5)
峰值透过率/%	≥60	30(70)

【注】^a 2007 年 4 月起更换了新的滤光片

为了满足对从近地面到 110 km 高度多参数的垂直测量,系统采用了双波长、三通道探测技术。利用 532 nm 波长激光对近地面到 30 km 高度气溶胶的消光系数,30~70 km 高度大气温度、密度进行测量;利用 589 nm 波长激光(对应于钠原子 D2 线荧光共振波长)对 80~110 km 高度钠层密度进行测量,三通道的探测参量如表 2。

表 2 探测参量

Tab. 2 Detecting parameters

	通道 1	通道 2	通道 3
钠密度	√		
大气密度温度	√	√	
平流层气溶胶	√	√	
对流层气溶胶			√

2 钠层密度的反演原理

由雷达方程可以得到,激光雷达探测到的光子数可以写成

$$N(z) = \eta N_0 T_a^2(z) \frac{1}{z^2} \sigma_{\pi}^i n^i(z) \delta z + N_B \quad (1)$$

其中, η 为激光雷达系统函数; N_0 为单脉冲发射光子数; $T_a^2(z)$ 为大气双程透过率; σ_{π}^i 是第 i 种散射的后向散射截面; $n^i(z)$ 是在 z 处产生该种散射的散射体的数密度; N_B 为背景噪声。

在钠层高度上 80~110 km,主要的散射过程为钠原子的荧光散射,相应的钠原子的数密度可以写为

$$n_{Na}(z) = \frac{N(z) - N_B}{\eta N_0 T_a^2(z) \frac{1}{z^2} \sigma_{Na} \delta z} \quad (2)$$

式中, σ_{Na} 为钠原子荧光散射的后向散射截面。在实际测量中,一般利用 30 km 附近大气的瑞利散射的信号对钠层荧光共振信号进行归一化处理,在参考高度 $z_0=30$ km 处,利用瑞利散射探测到的大气密度可以表示成

$$n_a(z_0) = \frac{N(z_0) - N_B}{\eta N_0 T_a^2(z_0) \frac{1}{z_0^2} \sigma_R \delta z} \quad (3)$$

式中, σ_R 为大气分子瑞利散射的后向散射截面。假设大气双程透过率 $T_a^2(z_0)$ 为常数,那么将方程(2)与方程(3)相比就得到钠原子密度反演公式:

$$n_{Na}(z) = \frac{\sigma_R n_a(z_0)}{\sigma_{Na}} \frac{(N(z) - N_B) z^2}{(N(z_0) - N_B) z_0^2} \quad (4)$$

在计算中取 $\sigma_R=4.14 \times 10^{-32} \text{ m}^2 \text{ sr}^{-1}$ ^[6], $\sigma_{Na}=4.00 \times$

$10^{-17} \text{ m}^2 \text{ sr}^{-1}$.

研究表明钠层密度随高度的变化可以用高斯分布近似:

$$n_s(z) = \frac{C_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (5)$$

式中, $n_s(z)$ 表示高度 z 上钠层的密度; C_s 为钠层柱密度; z_s 为质心高度; σ_s 为 RMS 宽度. 钠层的变化和大气对钠层的短期动力学和化学的影响都要通过这几个参数来反映. 将它们表示成空间矩阵的形式:

$$m_i = \int_{z_c - \Delta z_c}^{z_c + \Delta z_c} z^i n_s(z) dz$$

这里下标 i 表示第 i 阶矩. 通常取 $z_c = 90 \text{ km}$, $\Delta z_c = 30 \text{ km}$, 那么柱密度 C_s , 质心高度 z_s 和 RMS 宽度 σ_s 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} C_s &= m_0 \\ z_s &= m_1/m_0 \\ \sigma_s &= \left[\frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3 钠层密度的观测结果

3.1 基本观测特征

激光雷达自 2005 年 12 月建成以来, 一直长期进行夜间钠层密度观测. 截至 2007 年 4 月, 我们积累的有效观测天数 53 天, 观测时间基本覆盖了夜间 2000LT 到 0430LT. 图 1 给出的 2005 年 12 月 23 日凌晨 0358LT 采集的一组典型光子计数随高度分布的廓线. 其中 22 km 处为激光雷达电子门控系统开门的高度, 此前近空的强后向散射信号被压制了大约 3 个数量级; 从 22 km 到大约 60 km 附近, 光子

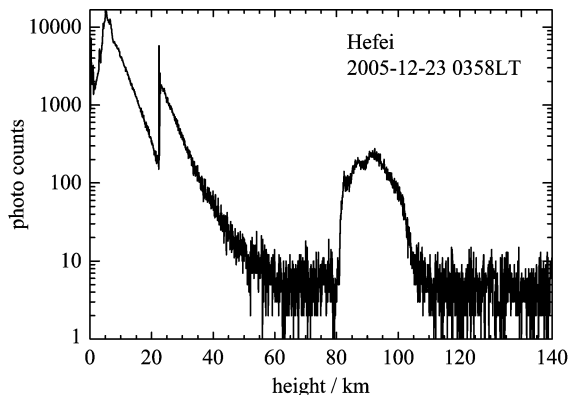


图 1 激光雷达工作在 589.0 nm 获得的典型的光子计数廓线 (积分时间 4 分钟)

Fig. 1 A typical lidar photocount profile at 589.0 nm (integrated time 4 min)

计数随高度增加而呈指数下降, 在 60 km 之后接近背景噪声 (~ 10 个计数). 从 80 km 光子计数开始显著增加, 并一直持续到 110 km 附近, 这是钠层钠原子荧光共振产生的后向散射荧光光子被激光雷达接收的结果.

图 2 中实线给出利用激光雷达 2005 年 12 月 23 日 0029LT 的观测数据 (250 秒) 反演得到钠密度廓线, 其峰值密度大约 6500 cm^{-3} , 峰值高度大致 91 km, 在 86 km 附近还有一个峰值密度为 4300 cm^{-3} 的次高峰; 虚线给出平均时间为 1 小时的 (0000LT \sim 0100LT) 钠原子密度廓线, 可见小尺度的结构被平滑, 但是双峰结构明显; 点划线给出当晚所有钠密度廓线的平均结果 (2015LT \sim 0358LT), 在整晚平均后, 钠原子密度廓线给出很好的近高斯分布, 峰值密度 4600 cm^{-3} . 其他夜间采样分析结果大致相同, 在短平均时间内, 钠层的廓线可能展现出各种不同的形态, 如单峰、双峰、多峰、上三角、下三角等, 但平均时间越长, 得到的密度廓线就越接近高斯分布.

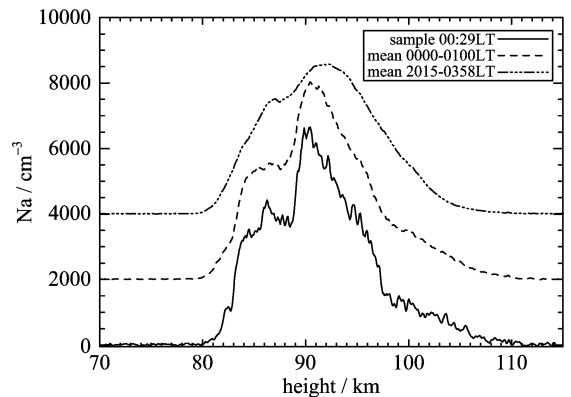


图 2 不同平均时间下的钠原子密度廓线

Fig. 2 Sodium density profile (integrated time 4 min, 1 hour, \sim 8 hour)

3.2 钠层密度的夜间变化

图 3 给出 2007 年 2 月 1~2 日典型的夜间钠层的观测结果. 可以看出钠密度后半夜较前半夜明显增大, 在凌晨 0500LT 之前, 钠层的下半部分向下拓展显著; 上半部分只是略有拓展, 整体变化不大; 钠层密度的峰值高度基本保持在 91~92 km 之间. 图 4 给出了其柱密度、质心高度和 RMS 宽度随时间的变化曲线. 柱密度在 1 日 1930LT 呈现最小值大约 $2.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 随后由于钠层向下展宽而增长, 并在 2 日凌晨 0200LT 达到最大值 $4.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$. 质心高度在 2300LT 之前变化的不大, 随后开始下降, 在 0300LT 达到最低 90.20 km, 其变化与柱密度反

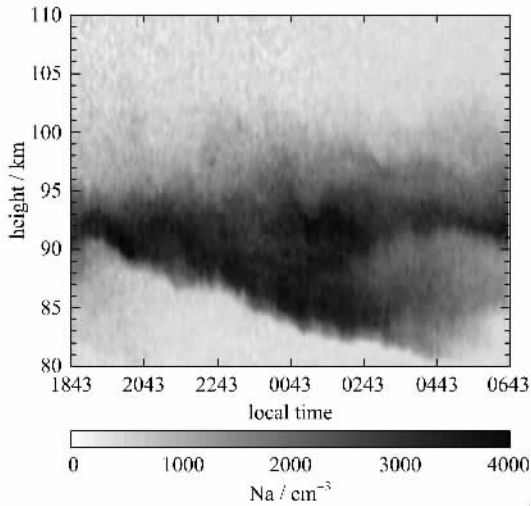


图 3 2007 年 02 月 01~02 日夜间钠层密度变化
Fig. 3 Sodium density variation during the night of Feb. 01~02, 2007

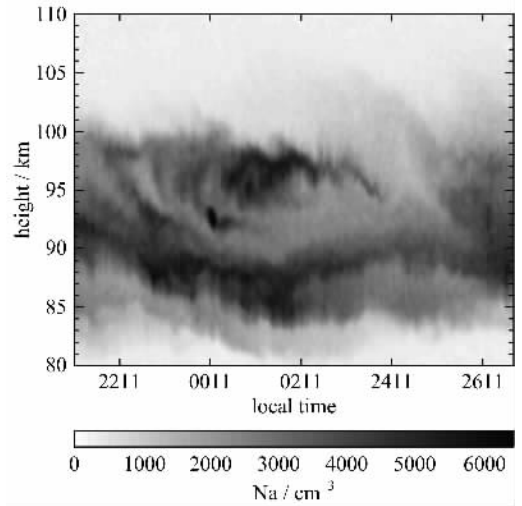


图 5 2006 年 12 月 28~29 日夜间钠层密度变化
Fig. 5 Sodium density variation during the night of Dec. 28~29, 2006

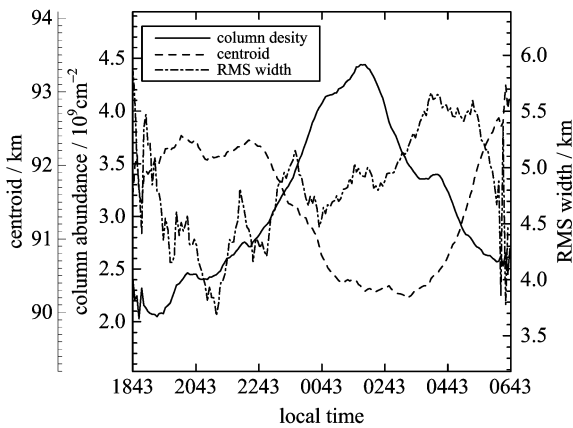


图 4 2007 年 2 月 01~02 日夜间钠层柱密度、质心高度和 RMS 宽度的时间变化曲线
Fig. 4 Temporal variations of sodium layer column abundance, centroid height and RMS width during the night of Feb. 01~02, 2007

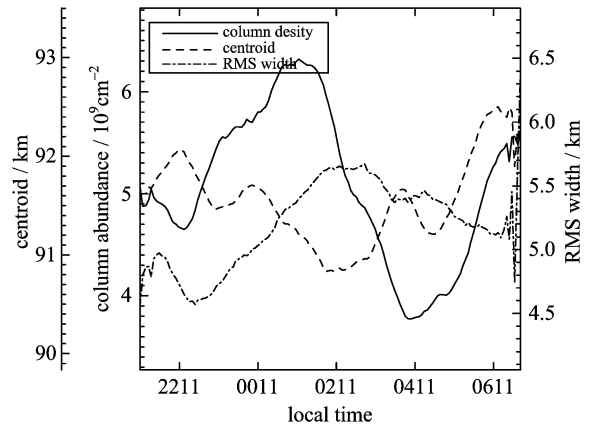


图 6 2006 年 12 月 28~29 日夜间钠层柱密度、质心高度和 RMS 宽度的时间变化曲线
Fig. 6 Temporal variations of sodium column abundance, centroid height and RMS width during the night of Dec. 28~29, 2006

相. RMS 宽度的变化稍稍滞后于柱密度,但基本上保持与之同相.

图 5 给出 2006 年 12 月 28~29 日夜间钠层观测结果. 与前面不同,钠层在午夜附近展现出显著的双峰结构,宽度向上向下都有所拓展;在下半夜钠层上部的峰消失,下部也有明显收缩;但在日出时刻附近钠层密度向上向下又有所增加. 图 6 给出相应的柱密度、质心高度和 RMS 宽度的变化,柱密度变化和质心高度变化大致反相,并领先于 RMS 宽度变化.

在钠层夜间观测中,另一个比较常见现象是突

发钠层(Na_s)事件. 图 7 给出 2007 年 03 月 20~21 日突发钠层的观测结果. 突发事件最显著的时间在 21 日凌晨 0100LT~0200LT 之间,钠层峰值密度达到 $17\,659.0\text{ cm}^{-3}$. 在图 8 中可见,柱密度在钠层突发期间显著增强,在 0117LT 达到极值 $5.03 \times 10^9\text{ cm}^{-2}$. 和前面分析不同,柱密度和质心高度的变化是同相的,但与 RMS 宽度是反相的,这说明突发事件主要发生在钠层上部较高的位置(94 km),并且暗示了钠层的上部和下部可能受到某种动力学过程的作用而向中间集中,导致 RMS 宽度下降.

在累计的数据中,有近 1/3 的观测天数内都有

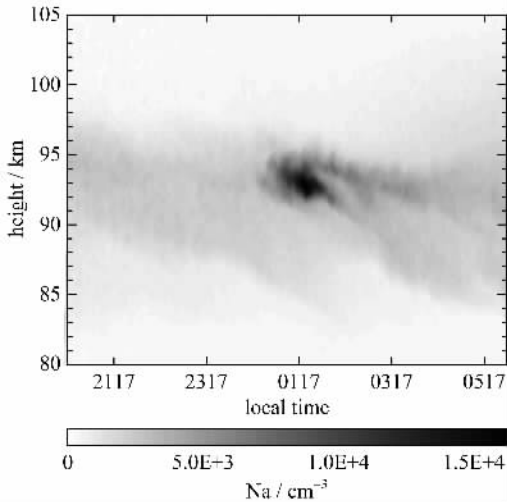


图 7 2007 年 3 月 20~21 日观测到的突发钠层事件
 Fig. 7 Sudden sodium layer observed during the night of Mar. 20~21, 2007

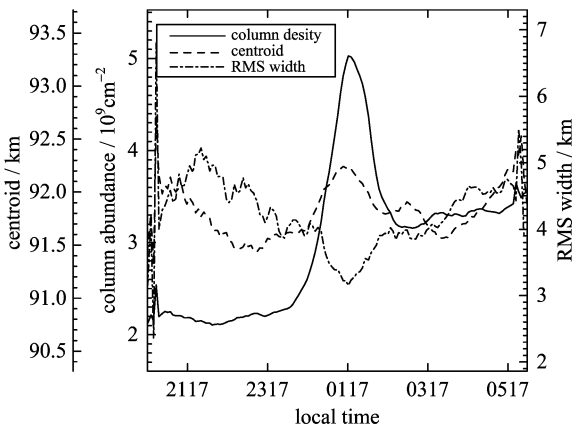
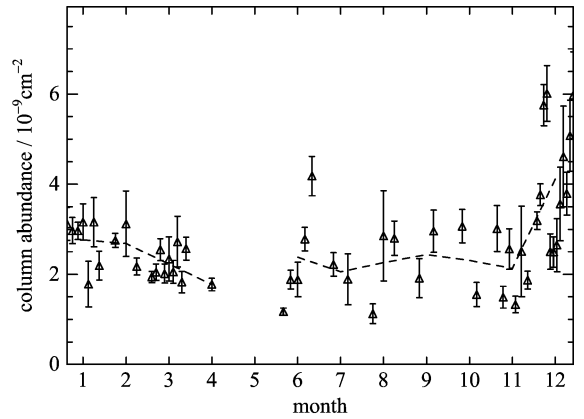


图 8 2007 年 3 月 20~21 日夜间钠层柱密度、质心高度和 RMS 宽度的时间变化曲线
 Fig. 8 Temporal variations of sodium column abundance, centroid height and RMS width during the night of Mar. 20~21, 2007

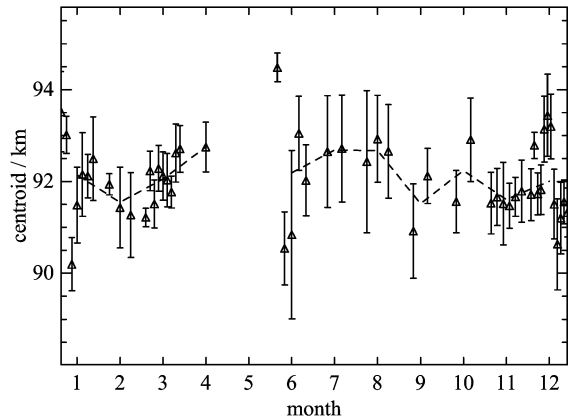
不同程度的突发钠层发生,大致时间都集中在午夜或者凌晨,持续时间为几十分钟到几个小时.突发钠层与电离层突发 E 层(Es),中高层大气动力学过程(如重力波等),以及流星注入都有关系,导致突发钠层的形成的原因至今仍是钠层研究的主要热点.

3.3 钠层的季节变化

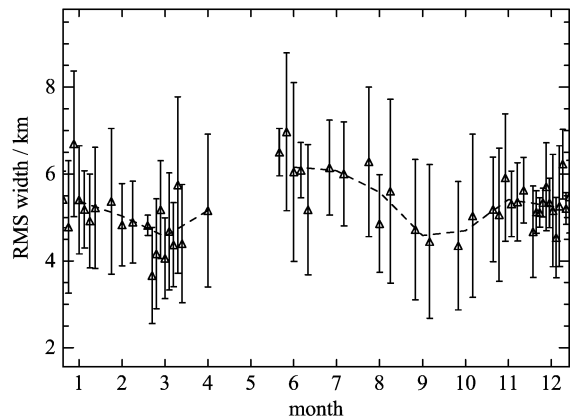
考察钠层的季节变化,采用了观测的 53 个夜晚的数据进行按月平均,由于观测中突发钠层比较常见,为了计算的可靠性,将有突发钠层的时间段扣除.钠层柱密度、质心高度、RMS 宽度的季节变化在图 9 给出.



(a)



(b)



(c)

△每天观测的平均值,一表示该日观测值的标准偏差的范围,--每天平均值按照当日观测时间长度加权后进行月份平均结果

图 9 柱密度(a)、质心高度(b)、RMS 宽度(c)的季节变化
 Fig. 9 Seasonal variations of sodium column abundance, centroid height and RMS width

柱密度最小的值 $1.126 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 出现在 6 月份,最大值 $6.014 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 出现在 12 月份.在冬季(特别是 12 月份)柱密度表现出显著的峰值,而在夏季月份柱密度则表现出相当宽广的极小值.一个值得注意的是,激光雷达观测的钠柱密度在 11 月份总

体呈现出低值,该月平均值 $2.131 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$,显著低于 12 月份和 10 月份.从月平均值曲线上看,柱密度最低值出现在 4 月份,但是由于 4 月仅有 1 天的观测数据,其持续时间约 1 小时,引入该日数据是为了弥补 4,5 月份的数据缺失,它并没有完全代表钠层 4 月的平均状态.我们激光雷达的观测结果在整体趋势上和北半球中纬度地区的钠荧光激光雷达是一致的.如 Gardner 等人^[7](40°N)和 Gibson 等人^[8](51°N)报道了在 11、12 和 1 月份钠层柱密度有特别显著的峰值(分别为 $16 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $12 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$),在夏季柱密度呈现低值(约 $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$); Peng 等人^[9]给出武汉上空(30.5°N)钠层柱密度的最大值常出现在 11 月份,大约为 5 月低值 $1.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的 2 倍.

质心高度的月平均值维持在 $91.5 \sim 92.5 \text{ km}$ 之间,夏季质心高度较高,而冬季相对较低.但是整体上并没有表现出显著的季节变化,不同于 Gardner 等人报道的质心高度呈现准半年周期变化.RMS 宽度却有准半年周期的变化,夏季和冬季的宽度较大,6 月份和 1 月份的月平均宽度为 6.16 km 和 5.37 km ;而在两个分点附近宽度最小,3 月份和 9 月份的 RMS 宽度分别为 4.56 km 和 4.58 km .

4 结论

本文介绍了中国科学技术大学的米-瑞利-钠荧光双波长激光雷达的系统,其双波长发射和三通道探测技术使得该激光雷达系统能够对近地面到 110 km 高度范围内的多种物理量——气溶胶、大气温度和密度、钠层密度进行探测.

利用该激光雷达系统近一年的钠层密度观测数据,我们分析了合肥地区钠层的主要形态、夜间变化、季节变化特点.合肥钠层柱密度最小值 $1.126 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 出现在 6 月份,最大值 $6.014 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 出

现在 12 月份.在冬季柱密度表现出显著的峰值,而在夏季柱密度则表现出相当宽广的极小值.质心高度没有明显的季节变化;RMS 宽度则表现出准半年变化.

参考文献(References)

- [1] Schmieder B, Vincent B, Baumjohann W, et al. Climate and Weather of the Sun-Earth System[C]//CAWSES, SCOSTEP's Program for 2004-2008.
- [2] Bowman M R, Gibson A J, Sandford M C W. Observation of mesospheric Na atoms by tuner laser radar[J]. Nature, 1969,221: 456-457.
- [3] Megie M, Blamont J E. Laser sounding of atmospheric sodium interpretation in terms of global atmospheric parameters[J]. Planet Space Sci, 1977,25: 1 093-1 109.
- [4] Gong S S, Yang G T, Wang J M, et al. A double sodium layer event observed over Wuhan, China by lidar[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30 (5). doi: 10.1029/2002GL016135.
- [5] Yi F, Zhang S D, Zeng H J, et al. Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N , 114.4°E) [J]. Geophys Res Lett, 2002, 29 (9). doi: 10.1029/2001GL014353.
- [6] Collis R T H, Russell P B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption[M]//Laser Monitoring of the Atmosphere (A77-22051 08-35). Berlin and New York:Springer-Verlag, 1976.
- [7] Gardner C S, Voelz D G, Sechrist C F Jr, et al. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois 1. seasonal and nocturnal variations [J]. J Geophys Res, 1986,91:13 659-13 673.
- [8] Gibson A J, Sandford M C W. The seasonal variation of the nighttime sodium layer[J]. J Atmos Terr phys, 1971,33:1 675-1 684.
- [9] Peng C, Yi F, Zhang S. Lidar study of the background Na layer over Wuhan: Long term and nighttime variations[J]. Chin J Space Sci, 2006,26(1):28-34.