

武汉上空 Na 层季节和夜间变化的 观测研究^{*}

毛 斐 易 帆

(武汉大学电子工程系 武汉 430079)

摘 要

根据武汉大学激光雷达 2001 年 3 月到 2002 年 10 月的观测数据,对武汉上空 (30.5°N , 114.4°E) 的背景 Na 层结构进行了研究,并与其他观测站尤其是 Urbana (40°N , 88°W) 的观测结果进行了比较.发现武汉上空 11 月的 Na 层柱密度最大,是 4 月的 2.5 倍,质心高度的极小值出现在 5 月和 11 月,极大值在 4 月、9 月和 12 月;全年平均 Na 层均方根宽度为 4.47 km. Na 层各参数呈现出周期性变化规律,其中 Na 层均方根宽度呈现出明显的半年周期性变化规律.夜间 Na 层柱密度呈现总体增加的趋势,质心高度在入夜后立即迅速上升,在 2000 LT 以后上升速度趋缓,凌晨 0500 LT 以后出现下降; Na 层均方根宽度在夜间约有 1.3 km 的起伏变化,它入夜后迅速减小,在午夜 0035 LT 时出现一低谷,然后随时间逐渐变宽.

关键词 背景 Na 层; Na 层柱密度; Na 层质心高度; Na 层宽度; 激光雷达

1 引言

Na 层位于 80—105 km 高度范围,通常在 90 km 附近出现密度峰值^[1]. Na 层主要源于流星的烧蚀,通过研究它可以获得中间层和低热层大气化学和动力学的相关知识.

1929 年,Slipher 观测到夜空中波长为 589 nm 的强谱线,但未能解释其来源.大约 10 年后, Bernard 首次对这一现象进行了解释,他指出这条气辉谱线来自高空的 Na 原子层.此后,人们采用曙暮光共振散射技术和箭载昼气辉光度计来测量 Na 层中的 Na 原子的密度和垂直分布.这些测量的精度与高度分辨率都相当低. 1969 年 Bowman^[2] 等人首次利用共振荧光激光雷达对 Na 层进行遥感探测.这种方法不仅使 Na 密度的探测精度与分辨率大大提高,而且与曙暮光观测相比极大地拓宽了观测的时间范围. 1971 年, Gibson 和 Sandford^[3] 在 Winkfield (51.4°N , 0.7°W) 首次通过雷达观测研究 Na 层的季节变化.随后世界上许多国家和地区先后建立了 Na 层荧光激光雷达观测站,对其各自上空 Na 层的特性进行探测和研究.已建立雷达观测站的地区有 Sao Paulo (23°S , 46°W)、Winkfield (51.4°N , 0.7°W)、Tokyo (35.6°N , 139.4°E)、Hawaii ($19^{\circ}50'\text{N}$, $155^{\circ}28'\text{W}$)、Syowa (69°S , 39.5°E)、Andoya (69°N , 16°E)、Haute Provence (43.9°N , 6°E)、Urbana (40°N , 88°W) 等.虽然这些观测站已形成了一定的纬度覆盖,但与地球空间相比仍然十分稀疏.为了在

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (49834040, 49774245)

2002-12-20 收到原稿, 2003-03-12 收到修定稿

更广泛的空间上获取 Na 层信息, 国际上一直鼓励建立更多的激光雷达观测站. 1999 年李洪均等人^[4]对武汉上空 Na 层分布进行了初步的理论模拟. 武汉大学建立的 Rayleigh 和 Na 共振荧光激光雷达于 2001 年 3 月开始在武汉大学校园内 (30.5°N, 114.4°E) 投入常规观测, 迄今已积累了 500 多小时的 Na 层观测数据, 使我们能够研究中纬地区 Na 层的结构和长期变化. 本文从观测结果中选取 32 个夜晚的数据来分析 Na 层密度和 Na 层柱密度、质心高度、宽度等参数的季节变化和夜间变化的特点.

武汉大学共振荧光激光雷达系统采用瑞利散射和钠荧光共振散射的方法探测中高层大气, 整套系统由发射、接收、光电检测、信号处理四部分组成^[5]. 光子回波信号通过接收望远镜系统和后置光路进入光电倍增管, 最后回波信号在多通道光子计数器中进行累加. Yi 等人^[6]已详细描述了此激光雷达的主要参数.

根据雷达方程^[7], 在 z 高度上钠原子数密度 $n(z)$ 由下式给定:

$$n(z) = \frac{z^2 \sigma_R n_a(z_R)}{z_R^2 \sigma} \frac{(N(z) - N_R R_L \Delta t)}{(N_R(z_R) - N_R R_L \Delta t)},$$

其中, z_R 为归一化高度, 这里 $z_R = 30 \text{ km}$; $n_a(z_R)$ 为归一化高度上的大气数密度; $N(z)$ 为 z 高度上距离 Δz 范围内在积累时间 Δt 内的回波光子计数; $N_R(z_R)$ 为 z_R 高度上距离 5 km 范围内 (即 $27.5\text{--}32.5 \text{ km}$) 的平均回波光子计数; N_B 为单位脉冲的背景光子计数; R_L 为激光器的脉冲重复频率; 根据激光器的输出波长和线宽, 计算出 Rayleigh 微分散射截面 σ_R 和钠荧光共振微分散射截面 σ 分别为: $\sigma_R = 4.012 \times 10^{-32} \text{ m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$, $\sigma = 0.425 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$.

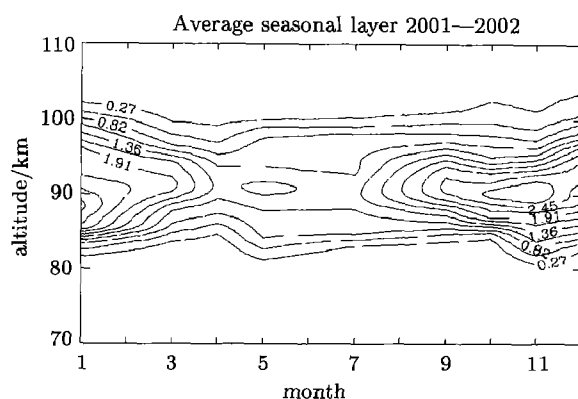
2 观测结果与讨论

武汉大学激光雷达 (30.5°N, 114.4°E) 于 2001 年 3 月开始观测, 到 2002 年 10 月已积累了 65 个夜晚的数据. 除去整夜存在突发 Na 层、月光较强、雾气过重以及多云的夜晚, 还剩下 32 个夜晚的数据. 在这 32 个夜晚的数据中, 进一步去除短暂突发 Na 层的情况, 就可以研究武汉上空的背景 Na 层的季节变化和夜间变化.

2.1 夜间 Na 层的季节变化

图 1 描绘了武汉上空 Na 层密度的季节变化, 可以看到 Na 层密度等值线在 11 月附近和 1 月附近密集并达到全年的两个最高, 而在 4—7 月间非常稀疏. 结合图 2 给出的 Na 层月平均密度剖面可以看出, 武汉上空 Na 层密度峰值在 10—12 月和 1 月较大, 而 4 月、5 月和 7 月则相对较小. Na 层平均密度峰值最大出现在 11 月, 其量值为 2990 cm^{-3} , 平均密度峰值最小出现在 7 月, 其量值为 1280 cm^{-3} , 两者相差 1700 cm^{-3} 多.

图 3 给出了武汉与美国 Urbana (40°N, 88°W) 两地上空 Na 层峰值密度季节变化的比较. 由图可以看到, 两地季节变化特征非常相似, 都是冬季大, 夏季小. 计算表明, 武汉和 Urbana 上空 Na 层最大与最小峰值密度的比值大约为 2. 由图 3 还可看到, 武汉上空的 Na 层峰值密度比 Urbana 大约小 1000 cm^{-3} , 这反映了 Na 层的纬度变化. 除了 Urbana 以外, 英国 Winkfield (51.4°N, 0.7°W)^[3], 美国 Fort Collins (41°N, 105°W)^[8], 以及法国 Haute Provence (43.9°N, 6°E)^[9] 等地上空 Na 层峰值密度的季节变化与武汉也非常类似.



注意到这些观测站的经度位置与武汉差别很大,因此我们可以推断,经度变化对 Na 层峰值密度的季节变化影响很小. 需要指出, 南极 Syowa 站的 Na 荧光激光雷达观测表明 Syowa (69°S, 39.5°E)^[10] 的 Na 峰值密度没有北半球中纬地区这样明显的季节变化规律.

图 2 还给出了每月 Na 密度剖面 and Na 层参数. Na 层的柱密度, 质心高度, 均方根宽度 3 个参数对研究 Na 层起着重要的作用, 定义如下, 若 $m_i = \int_{z_0 - \Delta z_0/2}^{z_0 + \Delta z_0/2} z^i n_s(z) dz$, 其中 $z_0 = 90 \text{ km}$, $\Delta z_0 = 30 \text{ km}$, $n_s(z)$ 是在 z 高度处的钠密度, 则柱密度为 $C_s = m_0$, 质心高度为 $z_s = m_1/m_0$, 均方根宽度为 $\sigma_s = \left(\frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^2 \right)^{1/2}$. 由图可以看出, 与峰值密度的季节变化类似, 11 月、12 月、1 月的柱密度较高, 而 4 月、5 月、7 月则相对较低, 这与其他纬度的观测结果是一致的^{[1],[3]}. 图 4 给出了武汉和 Urbana 上空 Na 层柱密度、质心高度和均方根宽度的季节变化. 由图可以看到, 两地 Na 层柱密度呈现相似的季节变化, Urbana 上空的 Na 层柱密度的最大值出现在 11 月份, 量值是 $7.53 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 而武汉上空 Na 层柱密度的最大值在 1 月, 量值只有 $3.69 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 是 Urbana 的 49%. Urbana 全年最小 Na 层柱密度出现在 6 月初, 而武汉在 4 月份. 由于我们缺 6 月份的观测数据, 所以还不能断定武汉上空 Na 层柱密度最小值出现的时间比 Urbana 前移了 2 个月. 通过计算, 我们发现, 武汉的年平均柱密度为 $2.64 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, Urbana 的量值是它的 1.68 倍. 根据 Plane 等人^[11] 的 Na 层理论模型, 多种化学反应控制着 Na 原子的产生与消失, 而且背景大气温度 and 风场等因素也强烈地影响着 Na 层的变化. 由于缺少其他含钠成分以及大气参量的观测数据, 目前我们还不能确定 Na 层这种纬度差异的原因.

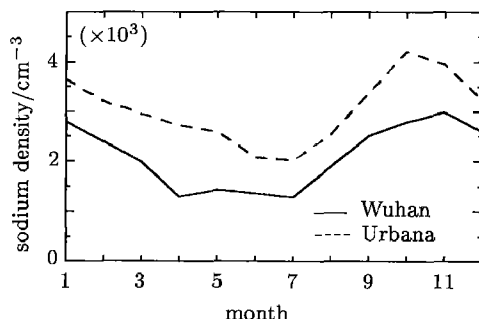


图 3 武汉和 Urbana 上空峰值 Na 层密度季节变化比较

Fig.3 Seasonal variations of Na density at Wuhan compared with those at Urbana

武汉 Na 层平均质心高度显示出准半年周期性变化. 质心高度在 3、4 月较大, 到 5 月降至 90.72 km , 7 月开始回升, 9 月达到 91.90 km , 10 月有所下降, 11 月降至全年最低 90.61 km , 到 12 月再次上升, 达到全年最高 92.11 km . 由图可以看出, 在前半年, Urbana 的 Na 层质心高度变化幅度比武汉的要大, 但后半年情况有所不同, Urbana 出现在 10 月的谷值为 91.30 km , 武汉在 11 月的谷值为 90.60 km . 两地 Na 层质心高度的年均值相差不大, 武汉是 91.35 km , Urbana 是 91.53 km .

两地 Na 层宽度季节变化符合得最好, 均为半年周期性变化, 且变化曲线低谷、高峰出现的时间基本相同. 武汉在 3 月和 9 月的两个谷值要略小于 Urbana 相应的这两个谷

值; 而 5 月份两地同时出现的峰值相差较大, 武汉为 4.88 km, Urbana 为 4.62 km, 武汉和 Urbana Na 层宽度年均值分别为 4.47 km 和 4.55 km. 比较质心高度与均方根宽度的季节变化可知, 两者具有反相变化的特点.

总体来说, 尽管 Urbana 与武汉的纬度相差 10° , 两地 Na 层具有几乎相同的季节变化规律, 这说明相同的机制在控制着两地 Na 层的季节变化.

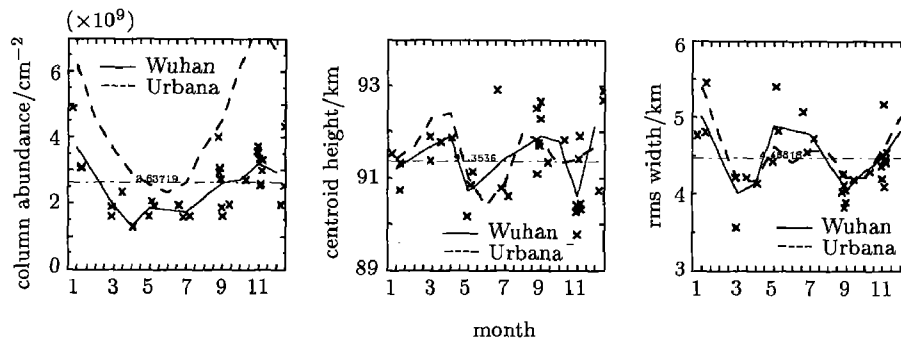


图 4 武汉和 Urbana 上空 Na 层宽度、质心高度、柱密度的季节变化 ($\times$ 表示武汉上空 Na 层日平均参数值, 实线是月平均参数值, 点划线为年平均值; 虚线表示 Urbana 上空 Na 层月平均参数值)

Fig.4 Seasonal variations of the abundance, centroid height and rms width of the sodium layer at Wuhan (solid curves) which are compared with those at Urbana (dashed curves) (asterisk donate daily values and dash-dotted curves donate the average value of year at Wuhan)

2.2 Na 层的夜间变化

把不同夜晚相同高度和相同时刻上的 Na 密度数据进行平均, 可获年平均 Na 密度随当地时和高度的分布. 进行平均的时间跨度为 1825 LT 到次日 0630 LT, 其中从 2000 LT 到 0505 LT 是 4 季观测均能覆盖到的时间段.

图 5 给出了武汉上空 Na 层密度的年平均夜间变化. 从图中可以看出, 峰值的密度最大值出现在 0500 LT 附近, 钠密度可达 3000 cm^{-3} 以上, 高度在 89.5 km 左右; 2230 LT 附近也有一个较小的峰, Na 密度为 2000 cm^{-3} , 高度在 93 km 附近; 在整个晚上 Na 层

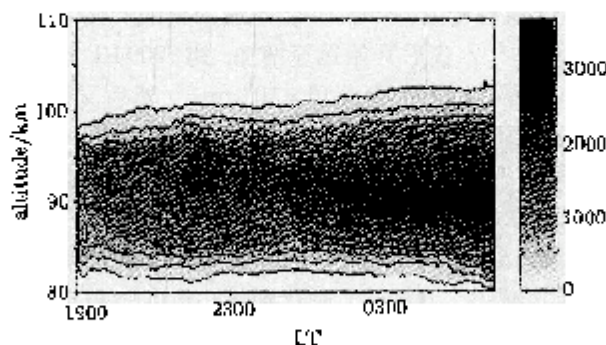


图 5 武汉上空 Na 密度夜间变化等值线.

Fig.5 Density isopleths of the whole year averaged nocturnal sodium layer at Wuhan.

的峰值高度呈稳步下降趋势, 从 2230 LT 到 0500 LT 下降了近 3 km. 比较 States^[12] 描绘的 Na 密度周日变化等值图, Urbana (40°N, 88°W) 上空 Na 密度夜间变化也在 2230 LT 和 0500 LT 点附近出现两个峰值密度的极大值, 但两峰值出现的高度相差不到 1 km.

由图 5 中还可以看到 Na 层上部的密度整晚逐渐增加下部的逐渐减小. 这一特点在图 6 表现得更加明显. 图 6 每隔一公里 Na 层密度夜间的变化图. 很明显, 86 km 以上 Na 密度整晚增加且变化幅度较大; 86 km 以下 Na 密度有小幅减小. Gardner^[1] 描述的 Urbana (40°N, 88°W) 上空 Na 层夜间变化也有类似的特点——高于 95 km 的 Na 层密度整晚明显增加而低于 80 km 处的 Na 层密度则相应减小. 而且从图 5 还可看出在日出时 86 km 以下 Na 密度变化曲线有明显的小突起, 而 Na 层上部则有相应的小凹陷.

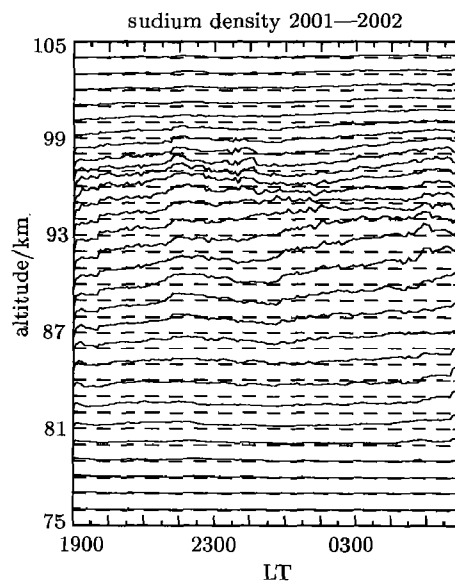


图 6 每隔 1 km Na 层密度的夜间变化图

Fig.6 Relative temporal variations of sodium density measured at altitude intervals of 1 km

图 7 给出了年平均 Na 层柱密度、质心高度、宽度的夜间变化. Na 层柱密度在 1850 LT 为全天最小值 $0.61 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 入夜后开始迅速增加, 到 2200 LT 附近达到 $2.62 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 之后一小段时间内减少, 在零点附近降至 $2.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 然后又稳步增加直至 0630 LT 到达最大值 $4.17 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 整晚 Na 层的柱密度增加了近 $4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$. Winkfield (51.4°N, 0.7°W)^[3] 上空夜间 Na 层柱密度也呈总体增加趋势, 整晚可增加 10%. Na 层的质心高度在 1850 LT 时为全天最低 89.22 km, 入夜后立即迅速上升, 在 2000 LT 后上升速度趋缓, 凌晨 0500 LT 后出现下降, 到 0630 LT 降至 91.06 km; Na 层宽度在 1840 LT 时为最大值 5.52 km, 在入夜后相应迅速减小, 0035 LT 时达到最小值 4.22 km, 然后随时间逐渐增大, 在 0630 LT 达到最大值 5.13 km (夏季 Na 层宽度最大值出现的早些, 在 0400 LT 附近). Na 层质心高度和宽度在起伏较大的地方表现出明显的反相位变化的特点. States^[12] 描述 Urbana (40°N, 88°W) 上空 Na 层柱密度也整晚递增且增长速度较快, 但到 0500 LT 以后开始有明显的下降; 质心高度呈增加趋势且变化幅度较大, 并在 0400 LT 附近开始下降;

Na 层宽度基本是入夜较大然后减小又增大, 大概在 2300 LT 附近出现最小值. 总的比较看来, Urbana (40°N , 88°W) 上空和武汉上空 Na 层参数的夜间变化规律基本相似.

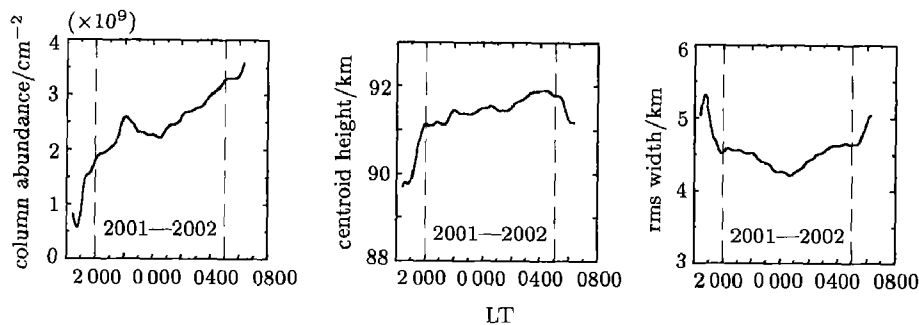


图 7 Na 层柱密度、质心高度、宽度的夜变化

Fig.7 Temporal variations of the column abundance, centroid and rms width of the average nocturnal sodium layer

3 结论

本文通过分析武汉大学激光雷达在 2001 年 3 月到 2002 年 10 月的观测数据, 研究武汉上空背景 Na 层的分布和变化特点. 武汉上空 Na 层密度和柱密度夏季最小而冬季最大, 与中纬地区其他观测站的观测结果一致, 但武汉的 Na 层密度和柱密度比 Urbana (40°N , 88°W) 总体偏小. 武汉上空 Na 层质心高度、宽度呈现半年周期性的季节变化. Urbana (40°N , 88°W) 与武汉的纬度上相差 10° , 但两地 Na 层具有相似的季节变化规律, 这说明相同的机制在控制着两地 Na 层的季节变化.

武汉上空 Na 层柱密度呈总体增加趋势, 一夜最多可增加约 $4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$; 夜间 Na 层质心高度的变化范围近 2.5 km, 它在入夜后迅速上升, 2000 LT 以后上升速度趋缓, 到凌晨 0500 LT 后出现下降; Na 层均方根宽度在夜间有大约 1.3 km 的变化, 它入夜后持续减小, 在 0035 LT 出现最小值 4.22 km, 然后增加.

参 考 文 献

- [1] Gardner C S, Voelz D G, Sechrist C F S *et al.* Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois 1. Seasonal and Nocturnal variations. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(A12):13 659—13 673
- [2] Bowman M R, Gibson A J, Sanford M C W. Atmospheric sodium measured by a tuned laser radar. *Nature*, 1969, **221**:456—457
- [3] Gibson A J, Sanford M C W. The seasonal variation of the nighttime sodium layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1971, **33**:1 675—1 684
- [4] Li Hongjun, Zheng Wengang, Yang Guotao *et al.* The observation and theoretical modeling of sodium distribution over Wuhan, China. *Chin. J. Space Sci.*, 1999, **19**(1):54—60. in Chinese (李洪均, 郑文刚, 杨国韬等. 中国武汉上空钠层分布的实验观测与理论模型. 空间科学学报, 1999, **19**(1):54—60)
- [5] Xi Chen *et al.* The photoelectric conversion subsystem and self-diagnosing subsystem of Rayleigh backscatter and sodium resonance lidar. *J. Wuhan Univ.*, 2002, **48**(3):365—369. in Chinese (陈曦等. 大气激光雷达光电转换单元及其自检系统. 武汉大学学报, 2002, **48**(3):365—369)

- [6] Yi Fan, Zhang Shaodong, Zeng Haijian *et al.* Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N, 114.4°E). *J. Geophys. Res.*, 2002, **29**(9):59-1—59-4
- [7] Richter E S, Rowlett J R, Gardner C S *et al.* Lidar observations of the mesospheric sodium layer over Urbana Illinois. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1981, **43**: 327—337
- [8] She C Y, Lowe R P. Seasonal temperature variations in the mesopause region at mid-latitude: comparison of lidar and hydroxyl rotational temperatures using WINDII/UARS OH height profiles. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, **60**:1573—1583
- [9] McNeil W J, Murad Edmon, Lai S T. Comprehensive model for the atmospheric sodium layer. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(20):16847—16855
- [10] Nomura A, Kano T, Iwasaka Y *et al.* Lidar observations of the mesospheric sodium layer at Syowa station, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, 1987, **14**(7):700—703
- [11] Plane J M C, Gardner C S, Yu Jirong *et al.* Mesospheric Na layer at 40°N: Modeling and observations. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(D3):3773—3788
- [12] States R J, Gardner C S. Structure of the mesospheric Na layer at 40°N latitude: Seasonal and diurnal variations. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(D9):11783—11798

LIDAR OBSERVATIONS OF THE MESOSPHERIC Na LAYER OVER WUHAN: SEASONAL AND NOCTURNAL VARIATIONS

MAO Fei YI Fan

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract

Based on the lidar observations between March 2001 and October 2002, the characteristics of background Na layer over Wuhan (30.5°N, 114.4°E) are presented and compared with other reported lidar measurements, especially with that of Urbana (40°N, 88°W). The sodium abundance in Wuhan reaches a maximum value in November which is approximately 2.5 times larger than that in April. In November and May, the layer centroid height reaches its minimum and its maximum in April, September and December. The yearly averaged rms width is 4.47 km. There is a variation trend in the parameters of Na layer. Especially, the layer rms width shows a semiannual variation trend. The sodium layer abundance generally increases through the night. After rapidly ascending from sunset, the layer centroid height climbs up slowly between 2000 LT and 0500 LT, then descend swiftly. The sodium layer rms width shows about 1.3 km variation during the night. At first the layer rms width diminishes, after arriving at a minimum at 0035 LT, it increases steadily with time.

Key words Background sodium layer, Layer abundance, Layer centroid height, Layer rms width, Lidar