

根据激光雷达观测结果研究 中国武汉地区钠层的分布

杨国韬¹ 刘炳模¹ 王嘉珉¹ 傅利平² 徐寄遥²
程学武¹ 万卫星¹ 龚顺生¹

1 中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071

2 中国科学院空间科学与应用研究中心, 空间天气开放实验室, 北京 100080

摘要 通过大量钠层荧光激光雷达观测数据的分析研究, 给出我国武汉地区钠层平均分布形态的基本特征. 结合钠层模型分析, 指出大气微量元素分布的纬度变化可能是导致不同纬度地区钠层平均分布形态差异的主要原因, 同时给出武汉地区随季节变化的钠层平均分布形态. 对武汉地区钠层分布形态时间变化的分析, 发现其短期变化与重力波活动及夜间变化与潮汐波活动相关.

关键词 钠层 分布形态 平均特性 时间演化 激光雷达

文章编号 0001-5733(2003)05-0577-07 **中图分类号** P352 **收稿日期** 2002-02-05, 2003-04-12 收修定稿

A STUDY OF SODIUM LAYER DISTRIBUTION OVER WUHAN, CHINA BASED THE LIDAR OBSERVATION RESULT

YANG GUOTAO¹ LIU BINGMO¹ WANG JIAMIN¹ FU LIPING²
XU JIYAO² CHENG XUEWU¹ WAN WEIXING¹ GONG SHUNSHENG¹

1 Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2 Key laboratory for Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract The basic characters of the sodium layer mean distribution over Wuhan, China are described from analysis of a large amount of sodium fluorescence lidar observation data. The result of sodium layer model calculation indicates that the latitude variety of the atmospheric minor species distribution might be the reason for the difference of the sodium layer mean distribution over different latitude regions. The season variations of the sodium layer mean distribution are given. Analyzing the time history of the sodium layer mean distribution, we find that its short period variations are correlated with the activities of gravity wave and its nocturnal variations are correlated with the activities of tide wave.

Key words Sodium layer, Distribution, Mean characteristics, Time evolution, Lidar.

1 引言

钠层是由处在高度大约 80~110km 的金属钠原

子所组成的一个大气层, 钠层荧光激光雷达的发明, 为详细而系统地研究钠层提供了一种有效的工具^[1]. 钠层的探测研究对认识钠层自身的特性, 包括它的起源以及变化特征具有重要意义. 由于高空

基金项目 国家自然科学基金项目(40075008, 49874037).

作者简介 杨国韬, 男, 1975 年生, 1996 年毕业于武汉大学物理系, 1998 年考取武汉物理与数学所硕士研究生, 现为在读博士研究生. 从事激光雷达建站, 观测与研究. E-mail: yangguotao163@163.net

钠层处于中性大气与电离大气的交汇区,它与大气层中其他原子、分子、离子有着各种复杂的物理、化学和动力学的相互作用,使得用钠层荧光激光雷达对钠层的探测成为研究中高层大气的一种重要手段.

就钠层本身的研究而言,虽然经过多年激光雷达的探测分析,对其基本特性已有了比较全面的认识^[2-4],但由于钠层本身的特殊性及其与周围大气耦合的复杂性,使人们对钠层的许多特性,如钠层分布的时空变化、钠层突发的起源,以及钠层特性的地域相关性等尚缺乏了解.因此,利用激光雷达在不同地区对高空钠层开展深入和系统的探测研究,将有利于增进对钠层特性的进一步认识.本文将利用作者多年来利用钠层荧光激光雷达对我国武汉地区(31°N, 114°E)钠层的观测,分析我国武汉地区钠层分布的平均形态特性及其时间演化规律.

2 激光雷达

用于探测高空钠层的激光雷达主要由发射激光系统、光学接收系统和信号检测处理系统组成^[5].发射激光系统为 Nd:YAG 激光器激励的染料激光器.激励光的波长为 532nm,染料激光的输出波长为 589nm,用以激发钠层中钠原子基态($3^2S_{1/2}$)到激发态($3^2P_{3/2}$)的共振荧光.染料激光器的输出能量约 50mJ,脉冲宽度约 10ns,重复频率 20Hz,光束发散约 0.5mrad.光学接收系统由直径 $\phi 950$ mm,焦距 $F = 2000$ mm 的反射式主镜(2000 年以前为直径 $\phi 400$ mm,焦距 $F = 1500$ mm 的透射式主镜),可调孔径光阑,直径 $\phi 50$ mm,焦距 $F = 150$ mm 准直透镜和窄带干涉滤光片组成.为保证对钠层回波信号的有效接收,望远镜的接收视场需控制在 $2 \sim 3$ mrad 以内,干涉滤光片的透射带宽约选为 3nm.信号检测处理系统包括制冷光电倍增管、低噪声前置放大器、瞬态光子计数器和一台微机.回波信号在光子计数器中进行累加,检测与发射的同步由光电触发实现.微机用于信号的自动采集和整机系统的控制.

本钠层荧光激光雷达的典型回波信号如图 1 所示.获取该回波信号的时间约为 5min,相应于对 5000 个激光脉冲的累积结果;光子计数器的门宽通常选定为 128 μ s,相应的高度分辨率约为 200m.该回波信号可分为两个主要部分:20~50 km 段为大气的瑞利散射信号;80~110 km 段为钠层的共振荧光回波信号.

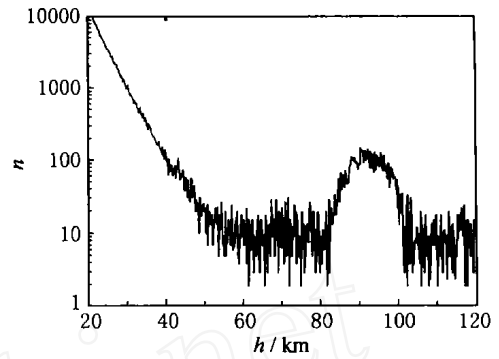


图 1 钠层荧光激光雷达的典型回波图

n 表示接收光子数.

Fig. 1 A typical echo of the sodium fluorescence lidar (n denotes the number of receiving photons)

3 结果与讨论

使用本文作者 1996~2002 年间的激光雷达钠层探测数据,从数据的质量和完整性考虑,在这些观测数据中,可供分析的数据主要集中在 43 个观测日内,总的回波数据(如图 1)共有 3722 个,总的累积观测时间约为 242.5h,均分布在每个观测日的 18:00 到次日的 07:00 时(北京时间)之间.观测数据的详细分布情况见表 1.

对图 1 所示的原始激光雷达回波数据进行反演处理,变成以钠原子密度随高度变化所表示的钠层分布曲线^[6],然后进行各种数据分析和研究.

3.1 钠层的平均分布形态

在表 1 的所有数据中去掉有明显钠层突发现象^[7]的数据后,按观测日取平均得到天平均数据,然后对各个天平均数据进行加权平均,得到武汉地区钠层分布形态在 1996~2002 年间的平均值,如图 2 所示(加权原则如下:在由天平均数据求年平均时,按各天平均数据的观测时间长短按比例进行加权;在对年平均数据求总平均分布形态时,又按各年平均数据中的总观测时间长短按比例进行加权).由图可见,武汉地区钠层平均分布形态的最大特点是呈现为一种上下沿基本对称的高斯型分布形态.其基本分布参数为:峰值高度约 92 km,钠原子密度,峰值一半处的宽度约 10 km,分布范围约在 80~105 km 之间.钠层的分布形态还可进一步用其上下沿标高(即钠层原子密度降低 e 倍所对应的高度)的分布来进行分析.分析结果表明,武汉钠层平均分布的上下沿标高也呈现出基本对称的分布形式.虽然上下沿标高的最小值均约为 2 km,但钠原子密度

表 1 观测数据的详细分布情况

Table 1 Time table of the observation data

观测日期	观测时间 t/h	回波数据
1996 - 02 - 05 ~ 06	8	49
1996 - 02 - 09	1	18
1996 - 03 - 01	3	36
1996 - 03 - 02	3	36
1996 - 03 - 03	3	37
1996 - 03 - 12	3	18
1997 - 03 - 07	2	27
1998 - 11 - 13	3	21
1998 - 11 - 14	3	21
1998 - 11 - 17 ~ 18	3	32
1998 - 11 - 19	4	31
1998 - 12 - 16	2	26
1999 - 03 - 16	1	23
1999 - 11 - 12 ~ 13	9	79
1999 - 11 - 13	2	18
1999 - 11 - 16	1	12
1999 - 11 - 17 ~ 18	11	139
1999 - 11 - 18 ~ 19	9	118
1999 - 11 - 19 ~ 20	11	133
1999 - 11 - 20 ~ 21	10	120
1999 - 11 - 28 ~ 29	11	141
1999 - 11 - 29 ~ 30	11	149
2000 - 06 - 13 ~ 14	9	112
2000 - 06 - 22	1	13
2000 - 06 - 27 ~ 28	7	92
2001 - 05 - 13	2	42
2001 - 05 - 18 ~ 19	6	120
2001 - 05 - 22 ~ 23	8	161
2001 - 05 - 23 ~ 24	6	120
2001 - 06 - 27	1.5	30
2001 - 07 - 02 ~ 03	7.5	152
2001 - 07 - 18 ~ 19	8	160
2001 - 07 - 24	1.5	34
2001 - 08 - 05	1.5	36
2001 - 08 - 16	3	69
2001 - 11 - 15 ~ 16	9	188
2001 - 11 - 17	3	66
2001 - 11 - 18 ~ 19	13	254
2001 - 11 - 19 ~ 20	12	234
2001 - 11 - 20 ~ 21	10	203
2001 - 12 - 21 ~ 22	6.5	131
2002 - 01 - 02 ~ 03	4	36
2002 - 01 - 20 ~ 21	9	185
共:43	共:242.5	共:3722

峰值一半处的上沿标高约为 +3.9 km,下沿标高约

为 -4.2 km,这说明钠层的平均分布形态虽然基本对称,但其上沿较下沿略显陡峭.

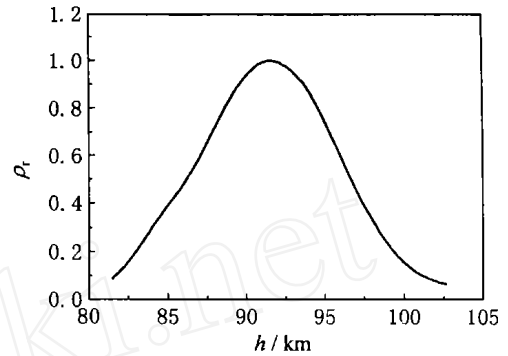


图 2 武汉上空钠层的平均分布形态

Fig. 2 The sodium layer mean distribution over Wuhan

与文献[8~10]的结果比较可知,图 2 所示的武汉地区钠层平均分布形态与 Clemesha 等^[8]在(23 S, 46 N)处和 Megie 等^[9]在(44 N, 6 E)处的观测结果相近,而与 Tilgner 等^[10]在(69 N, 16 E)处的观测结果相差较大.前两者得到的也都是一个基本对称的钠层分布形态,特别是 Clemesha 等报道的上沿较下沿略显陡峭的钠层平均分布形态与本文的结果十分接近;而后者所报道的钠层平均分布形态则呈现出明显的不对称,其上沿标高而下沿标高小,即下沿比上沿陡峭得多.此外,本文得到的钠层峰值高度的平均值为 92 km,而 Clemesha、Megie 和 Tilgner 所报道的钠层峰值高度的平均值分别为 92.5 km、90 km 和 89 km.由于钠层峰值高度的平均值在一年中的变化通常在 ± 1 km 以内,而且激光雷达测量钠层峰值高度的误差远小于 ± 1 km.因此,本文的钠层峰值高度平均值的测量结果与 Clemesha 等的结果相同,而比 Megie 和 Tilgner 等的结果要高.

根据大量观测数据的平均值计算钠层的分布形态,因此它所反映的是钠层在多种因素作用下的一种稳定的动态平衡分布.通常认为,这种稳定的动态平衡分布是在一定的含钠成分注入和耗散条件下,通过含钠成分和大气中的各种微量成分之间的光化学相互作用,并在大气的涡旋扩散作用下所造成的.本文在武汉地区(31 N, 114 E)观测到的钠层平均分布形态和 Clemesha 等^[8]在中低纬地区(23 S, 46 W)观测到的结果相同,与 Megie 等^[9]在中纬地区(44 N, 6 E)观测到的结果相近,而与 Tilgner 等^[10]在高纬地区(69 N, 16 E)观测到的相差较大,说明在不同纬度地区造成钠层达到稳定动态平衡的条件并不相同.这些不同的条件可以是:中层顶区温度的纬

度差异所导致的不同速率的热化学反应,太阳辐射的纬度差异使光化学过程在钠层平衡中有不同的贡献,以及大气微量成分分布的纬度变化可能使钠层达到不同的平衡状态等. 由于目前激光雷达给出的主要是夜间观测结果,故本文暂不考虑太阳辐射方面的影响,而仅从温度和大气微量成分的纬度差异来分析它们对钠层平均分布形态的影响.

李洪均等^[6]曾按中纬地区的条件,利用钠层的静态模型对武汉钠层的平均分布形态进行过理论模拟,得到了较为对称的钠层平均分布形态,如图 3a 所示,与本文的实验观测结果相符. 在此基础上,分别将中层顶的温度调整 ± 50 和将模型所涉及的 8 种主要微量成分的含量增大一倍或减小至 $1/2$,来分析其对钠层分布形态的影响. 结果发现,钠层分布形态对 H 、 O_3 、 O 等几种微量成分的变化比较敏感,而其他成分和温度的影响则不太大. 因此,本文参照这 3 种微量成分随纬度变化的数据^[11],将 H 的浓度扩大 3 倍, O_3 的浓度减小到 $1/3$, O 的浓度减小到 $1/2$,再用本文的静态模型进行计算,得到如图 3b 所示的结果. 这种上沿陡、下沿缓,峰值高度低于 90 km 的不对称钠层分布形态与 Tilgner 等^[10]在高纬度地区所得到的观测结果相符. 因此,本文认为几种大气微量成分浓度随纬度的变化,可能是导致不同纬度地区钠层平均分布形态不同的主要原因.

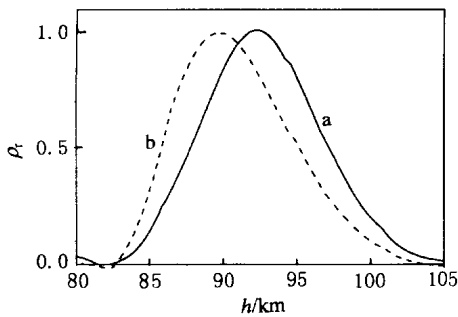


图 3 钠层分布形态的理论模拟结果
a: 中纬地区; b: 高纬地区.

Fig. 3 The theoretic simulation results of the sodium layer mean distribution

观测时间位于 11 月份至 3 月份之间的观测数据称为冬季的观测数据,而 5 月份至 9 月份之间的观测数据称为夏季的观测数据,并以此两组数据分别计算出武汉钠层冬夏两季的平均分布形态见图 4. 由图可见,武汉地区钠层呈现出强烈的季节变化,在冬季月份的钠层原子密度较之夏季月份的钠

层原子密度大 2 倍以上,这与 Clemesha 等^[8]在低纬度地区的观测结果相类似. 钠层原子密度的季节变化通常认为是由于存在着钠原子消失机制造成的,而与变化相对较小的钠层通量的变化关系不大. 在控制钠原子消失机制的主要中性化学反应 $Na + O_2 + M \rightarrow NaO_2 + M$ 中,反应的速率常数为: $k = 8.4 \times 10^{-34} \exp(290/T)$, T 表示温度,可见该反应对温度很敏感,温度降低时反应加速从而使钠原子的消失速度加快. 在中层顶区夏季温度较之冬季为低,从而使钠原子消失速度在夏季较高,这可能是钠原子密度在夏季比冬季低的主要原因^[12].

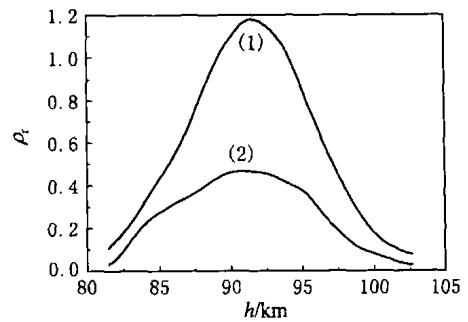


图 4 武汉上空在不同时间段钠层的平均分布形态

- (1) 冬季(11~3月)的平均分布形态;
- (2) 夏季(5~9月)的平均分布形态.

Fig. 4 The sodium layer mean distribution in different periods over Wuhan

3.2 钠层分布形态的统计分析

虽然通过对长时间观测所获得的大量数据进行平均可以得到如图 2 所示的平滑而规整的钠层分布形态,但从图 1 所示的短期(约 5min)观测数据看,钠层的分布形态却是很不规则的. 即使是 1~2h,甚至对整个观测日(通常为 4~8h)的数据取平均,也可看出钠层分布形态这种复杂多变的特征.

先对观测数据进行 1h 平均来分析武汉钠层分布形态的短期变化特性. 结果表明,在 1h 平均的数据中,除确有一些如图 2 所示的上下沿近似对称的分布形态外,大量的数据则是呈现为各种不规则的变化形态. 图 5 即为本文归纳出的几种不规则分布形态类型. 图 5(a, b)为上下沿不对称的钠层分布形态,分别对应于峰值高度的下移和上移,但整个钠层仍呈现一个完整的结构. 图 5(c, d)则为钠层被分裂为几个层次的情况,分别表现为双峰和多峰的分布形态. 在这种分层形态中,峰间的谷值与相邻峰值的差异通常在 5% 以上,严重时差值可达

20%。由于1h平均的钠层分布激光雷达观测数据的误差多在3%以下,因此这种多峰的分层分布形态并非观测误差或噪声等引起,而是钠层结构受到强烈扰动的反映。

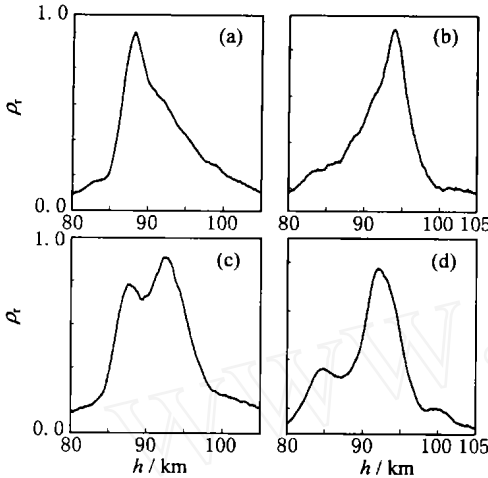


图5 几种典型的不规则钠层分布形态

Fig. 5 Several irregular sodium layer distributions

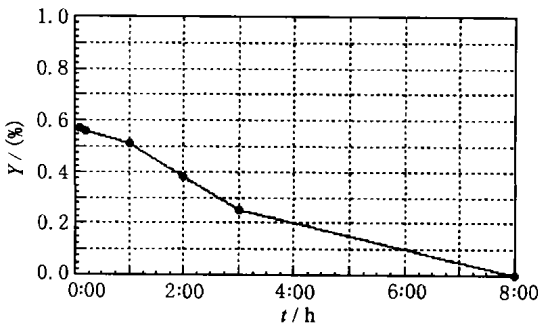


图6 武汉钠层分布形态出现频度随数据平均时间的变化

Fig. 6 The sodium layer stratification distribution appearance frequency as a function of the data average time

为进一步研究这种钠层分层形态的出现规律,对钠层观测数据按不同时间取平均,并分别计算分层形态的出现频度,所得结果如图6所示。可见,钠层分层形态的出现频度随观测数据平均时间的加长而迅速减小:在平均时间为1h的观测数据中具有分层形态的数据超过50%;在平均时间为3h,则具有分层形态数据的比例约25%;当对长达8h的观测数据取平均,则基本上不出现分层形态。为定量地描述钠层分层形态的出现规律,假定图6所示结果大致符合指数变化形态,用式 $Y = A \exp(-t/t_0)$ 对其进行拟合。式中 Y 为分层形态的出现频度, A 为当观测时间 t 趋近于零时的出现频度。由此即可求得钠层分层形态出现频度的特征时间 t_0 (即出现频度降为最大值的 $1/e$ 所对应的观测时间) 约为3.7h。

这一结果显示,武汉地区钠层分层形态大多出现在大约4h的观测时间之内。Megie等^[9]也曾报道过对钠层分层形态的观测,他们在法国南部(44°N, 6°E)所得到的结果是对于1h平均的数据,分层形态的出现频度约为15%,而本文在武汉地区(31°N, 114°E)观测到的钠层分层形态出现频度则约为50%,比他们的结果要高很多。在小时平均基础上,本文对钠层分层形态出现频度随时间的分布作了统计,结果如图7。由图可见,武汉地区钠层的分层形态通常在22:00前后出现频度最高,而在大约凌晨3:00~4:00出现频度最低。

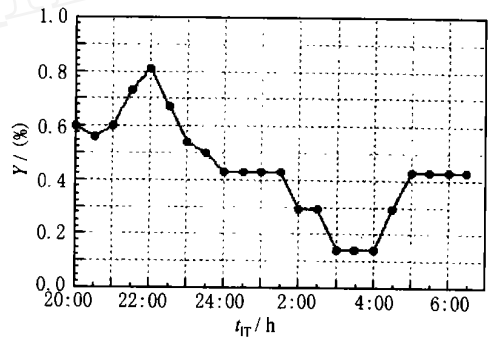


图7 武汉钠层分层形态出现频度随时间的分布

Fig. 7 The sodium layer stratification appearance frequency as a function of time

以上结果说明,钠层的分层现象具有很明显的时间特征。特别是其出现频度随观测平均时间的缩短而增加的特点,表明钠层分层形态的发生是受到一种短时间大气强烈扰动的结果。通常认为,这种短时间尺度的大气扰动多为重力波活动向中层顶的传播和耗散所造成的^[13]。本文的上述结果进一步支持了这一观点。这就是说,图6和图7所示的对钠层分层形态的观测结果实际上反映了武汉上空重力波的活动特征。因此,本文对钠层分层形态出现频度的观测给出比Megie等人更高的结果,说明武汉地区(31°N, 114°E)中层顶区的重力波扰动比法国南部地区(44°N, 6°E)要更为频繁。图6的结果则表示,武汉地区重力波活动的时间尺度大多集中在4h之内。至于图7给出武汉地区钠层的分层形态在22:00左右有最高的出现频度,本文目前尚给不出合理的解释。但可以指出,Gardner等^[13]在美国(44°N, 88°E)研究重力波特性的时候,也给出了重力波活动出现频度与当地地方时的关系,其结果与本文对钠层分层形态的观测结果(图7)非常类似。这不仅进一步表明钠层的分层形态与重力波活动相关,而且两者都与地方时有关。

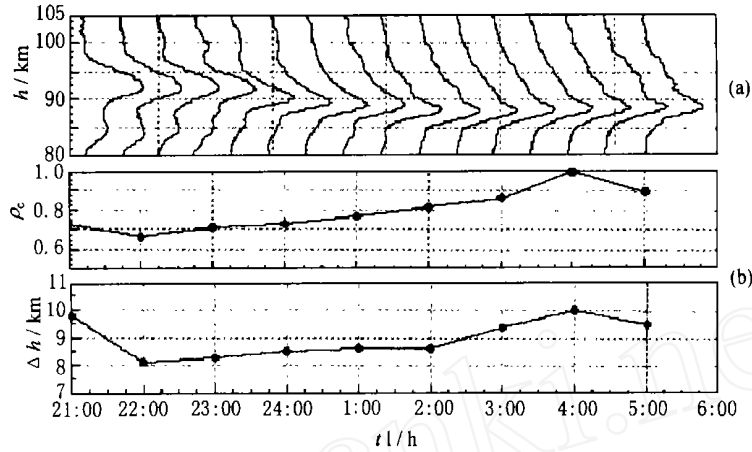


图 8 武汉钠层分布的夜间演化

(a) 分布形态演化; (b) 基本参数演化.

Fig. 8 The nocturnal variations of the sodium layer over Wuhan

3.3 钠层分布形态的夜间演化

为研究武汉地区钠层分布形态在较长时间内的变化特点,对表 1 中所列的连续观测时间超过 8h 的观测日的数据进行了分析. 发现在这些观测日中,钠层的分布形态大多呈现出基本相似的夜间演化规律:一个典型的例子如图 8a. 该图取自 1996 年 2 月 5~6 日获得的数据,连续观测时间为 8h. 图中的每个钠层分布形态曲线均为半小时观测数据的平均结果. 由图可见,在晚上 7:00~8:00 开始观测时,钠层的峰值位置一般较高,约在 95 km 附近. 然后峰值高度缓慢而有规律的下移. 随着时间的推移,峰值高度的下降速度减缓,直至次日凌晨 3:00~4:00,峰值高度又呈上移的倾向. 在图 8b 中,本文同时给出了当日钠层的相对柱密度 ρ_c 和半高宽度 h 的夜间演化情况. 相对柱密度用如下方式求得:对图 8a 中的各个钠层的相对密度分布进行积分求得各自的柱密度,然后将柱密度最大者定为 1,其他的则与之相比较而得到各柱密度的相对值. 由图可见,钠层的这些主要参数在夜间也都呈现出一种缓慢的规则变化.

仔细分析图 8 可以发现钠层诸多参数的夜间演化都具有周期性特征. 如钠层的柱密度和半高宽度基本上都在大约 22:00 达到极小,而在大约凌晨 4:00 达到极大,显示出一种约以 12h 为周期的有规律变化(图 8b). 仔细观察图 8a 也可以看出钠层峰值高度的这种周期性变化,只是其变化的相位与柱密度及半高宽度的相位有些不同. 本文认为,武汉地区钠层分布形态的这种周期性的有规律变化很可能是受高层大气中的潮汐波影响所致,而图 8 所示

的钠层演化则是受一种半日潮汐波活动影响的结果. 因此,本文可以从这类观测结果中求得大气潮汐波活动的一些参数. 如潮汐波所产生的垂直风场 V_z 可由下式求出^[14]

$$|V_z| = H (C_{\max} - C_{\min}) / (C_{\max} + C_{\min}),$$

其中: C_{\max} , C_{\min} 为钠层柱密度最大值和最小值,大气加热比 $\gamma = 1.4$,潮汐波的圆频率 $\omega = 2\pi / T$,大气标高 $H = 6$ km,潮汐波的周期 $T = 12$ h.

将图 8 的结果代入,可求出 $|V_z| = 38$ cm/s,这就是说,1996 年 2 月 5~6 日武汉上空的一个半日潮汐波,所产生的垂直风场约为 40cm/s.

从上述结果可见,通过钠层荧光激光雷达对钠层的探测,不仅可对钠层本身的特性及其与周围环境相互作用的机制进行研究,而且钠层可作为一种示踪物,对高层大气的动力学,特别是各种波动过程进行研究. 这是因为,一方面重力波、潮汐波等活动在钠层所在高度通常具有较大的强度,另一方面钠层很陡峭的上下沿也使得钠层的分布形态对波动过程的响应极为敏感,从而使得钠层荧光激光雷达成为研究高层大气动力学的一种有效工具.

4 结 论

4.1 武汉地区钠层平均分布形态的近似对称高斯分布. 这种平均分布形态与其他中纬地区的观测结果相近而与高纬地区的观测结果相差较大.

4.2 通过钠层模型的分析,认为武汉地区和高纬地区钠层分布形态不同的主要原因是不同纬度大气微量组份的分布不等所造成.

4.3 武汉地区钠层分布形态随季节变化,冬季的钠层密度比夏季高 2 倍以上. 通过对武汉地区钠层分布形态短期变化的特征进行研究,给出了小时平均的分层分布出现频度高达 50 % 的结果,并给出了这种出现频度的特征时标.

4.4 钠层的分层形态与重力波活动相关,预示武汉地区有更为频繁的高空重力波活动,且重力波的活动频度与地方时有关. 对武汉地区钠层分布形态夜间变化的资料分析,指出了它与潮汐波特别是半日潮汐波活动的相关性,并可由此求得潮汐波的一些参数.

研究结果表明,钠层荧光激光雷达不仅能对钠层特性进行直接探测研究,也是研究中层顶区大气原子分子相互作用和大气波动过程的重要手段.

参考文献

- [1] Megie G. Observations of trace metals in the upper atmosphere in Laser remote chemical analysis. In: Laser Remote Chemical Analysis. R. M. Measures ed. New York: John Wiley, 1988. 333 ~ 408
- [2] Gardner C S. Sodium resonance fluorescence Lidar applications in atmospheric science and astronomy. Doc. IEEE, 1989, 77:408 ~ 427
- [3] She C Y, Yu J R, Latifi H, et al. High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesosphere sodium temperature measurements. Appl. Opt., 1992, 31:2095 ~ 2106
- [4] Nagasawa C, Abo M. Lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude. Geophys. Res. Lett., 1995, 22:263 ~ 266
- [5] 龚顺生,曾锡之,薛新建等. 中国武汉上空钠层的首次激光雷达观测. 中国科学(A 辑), 1997, 27: 370 ~ 373
GONG Shunsheng, ZENG Xizhi, XUE Xinjian, et al. First time observation of sodium layer over Wuhan, China by sodium fluorescence lidar. Science in China (Series A) 1997, 27: 370 ~ 373
- [6] 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,空间科学学报, 1999, 19(1): 54 ~ 60
LI Hongjun, GONG Shunsheng, ZHENG Wengang, et al. The observation and theoretic simulation of the sodium layer over Wuhan, China. Chinese Journal of Space Science, 1999, 19(1):54 ~ 60
- [7] Hansen G, von Zahn U. Sudden sodium layers in polar latitudes. J. Atmos. Terr. Phys., 1990, 52:585 ~ 608
- [8] Clemesha B R, Simonich D M, Takashashi H, et al. The annual variation of the height of the atmospheric sodium layer at 23 °s, Possible evidence for convective transport. J. Geophys. Res., 1992, 97:5981 ~ 5985
- [9] Megie G, Blanont J E. Laser sounding of atmospheric sodium, Interpretation in terms of global atmospheric parameters. Planet. Space. Sci., 1977, 25:1093 ~ 1109
- [10] Tilgner C, von Zahn U. Average properties of the sodium density distribution as observed at 69 N Latitude in Winter. J. Geophys. Res., 1988, 93:8439 ~ 8454
- [11] Fukuyama K. Latitudid distribution of minor neutral hydrogenoxygen constituents in the Winter mesosphere and lower atmosphere J. Atmos. Terr. Phys., 1974, 36:1297 ~ 1320
- [12] Gardner C S, Voelz D G. Lidar studies of the nighttime sodium layer over urbana, Illinois, 1. Seasonal and Nocturnal Variations. J. Geophys. Res., 1986, 91:13659 ~ 13673
- [13] Gardner C S, Voelz D G. Lidar studies of the nighttime sodium layer over urbana, Illinois, 2. Gravity waves. J. Geophys. Res., 1987, 92:4673 ~ 4694
- [14] K H Kwon, C S Gardner, et al. Daytime lidar measurements of tidal winds in the mesospheric sodium layer at Urbana, Illinois. J. Geophys. Res., 1987, 92:8781 ~ 8786