科学通报 2011 年 第 56 卷 第 3 期：247 ~ 253
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

钠荧光多普勒激光雷达测量中间层顶区域大气温度

胡雄[①], 闫召爱[①②*], 郭商勇[①], 程永强[①], 龚建村[①]

① 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;
② 中国科学院研究生院, 北京 100049
* 联系人, E-mail: yanza@126.com

2010-08-19 收稿, 2010-11-09 接受
国家自然科学基金资助项目(40774087)

摘要 建立了一套钠荧光多普勒激光雷达系统用于测量中高层大气环境参量. 钠荧光多普勒激光雷达系统主要包括发射系统、接收系统、数据采集控制和数据处理系统等. 该激光雷达主要使用窄线宽的 589 nm 激光去激发中间层顶区域的钠原子, 钠原子受激后发射共振荧光; 接收采集钠原子共振荧光, 通过分析其多普勒展宽获得中间层顶区域(约 75~105 km)的大气温度. 利用该激光雷达系统开展了观测实验, 成功获得了中间层顶区域钠原子数密度廓线和大气温度廓线; 将钠荧光多普勒激光雷达测量结果与 TIMED/SABER 温度测量结果进行比较, 结果显示两者非常一致, 说明了该激光雷达探测结果具有可靠性.

关键词
多普勒激光雷达
钠共振荧光
大气温度

中间层顶是低层大气和高层大气耦合的重要区域, 也是目前人们了解最少的区域. 其温度结构对于大气的稳定性、能量传输、大气化学过程以及动力学行为等有重要的影响. 中间层顶是地球上最冷的区域, 目前不断从极区向中高纬度区域扩展的夜光云现象, 可能与全球气候变暖导致的中间层变冷有关. 中间层顶温度结构的监测, 对于研究和理解上述前沿科学问题具有重要的意义.

用于测量大气温度的激光雷达主要有: 瑞利散射激光雷达[1~3]、拉曼散射激光雷达[4,5]、共振荧光散射多普勒激光雷达[6,7]、高光谱分辨率激光雷达[8,9]以及差分吸收激光雷达[10]等. 其中钠荧光多普勒激光雷达主要用于中间层顶区域(约 75~105 km)的大气温度和风场测量.

目前国际上利用中间层顶区域的钠、钾、铁、钙等粒子的荧光, 研制出了钠荧光激光雷达、钾荧光激光雷达、铁波尔兹曼激光雷达、钙荧光激光雷达等进行中高层大气探测[7,11]. 1969 年, Bowman 等人[12]首次利用可调谐激光器开展了中间层顶区域钠原子的观测. 1979 年, Gibson 等人[13]首先研究了利用钠原子精细光谱以及窄线宽激光探测中间层顶区域大气温度的可能性. 1985 年, 第一台常规运行的钠荧光多普勒激光雷达在 Andoya (Norway)开始大气温度的观测[14]. 1990 年美国科罗拉多州立大学[15]和伊利诺伊大学[16]合作建立了首台先进的窄线宽双频钠荧光多普勒激光雷达, 提高了中间层顶大气温度测量精度. 随后, 他们采用激光锁频、频率调节技术进一步发展了大气风场/温度探测三频钠荧光多普勒激光雷达[17,18]. 2002 年科罗拉多州立大学钠荧光多普勒激光雷达升级为 2 个发射光束, 实现了大气温度与风场的同时观测[19]; 2006 年该激光雷达升级为 3 个发射光束, 在进行大气温度和风场测量的同时, 还进行了大气动量通量的测量[20].

在国内, 1996 年中国科学院武汉物理与数学研究所研制了我国第一台瑞利/钠荧光激光雷达[21]. 目前, 武汉大学在武汉[22]、中国科学技术大学在合肥[23]、中国电波传播研究所在青岛、中国科学院空间科学与应用研究中心在北京和海南利用钠荧光激光雷达开展中高层大气观测. 但是, 这些钠荧光激光雷达系统, 都不是多普勒技术系统, 只能用于探测钠

英文版见: Hu X, Yan Z A, Guo S Y, et al. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-010-4306-x

原子密度廓线, 不能够用于探测中间层顶的大气温度和风场. 武汉大学于 2006 年研制了我国首台用于探测中间层区域温度的铁玻尔兹曼激光雷达[24].

为了同时测量中间层顶区域大气温度与风场, 中国科学院空间科学与应用研究中心研究了钠荧光多普勒激光雷达的原理, 开展了光子数回波信号仿真和大气参数反演的研究[25,26], 并测量了钠原子饱和荧光光谱[27]、研发了利用饱和荧光光谱对激光进行锁频技术[28], 研制了一整套窄线宽激光、三频多普勒技术的钠荧光激光雷达, 这是我国首台钠荧光多普勒激光雷达. 我们利用该激光雷达系统在北京开展了中高层大气的观测实验. 本文主要介绍该激光雷达大气温度测量原理、系统组成、大气温度测量结果及其与 TIMED/SABER 卫星温度数据的比较等.

1 钠荧光多普勒激光雷达测量大气温度原理

在约 75~105 km 高度范围的大气层中, 存在一金属层, 里面含有微量钠(Na)原子. 发射波长 589 nm 的激光, 激光激发大气中的钠原子发射共振荧光; 通过测量荧光光谱的多普勒展宽, 可以获得温度信息. 在中间层顶区域, 荧光光谱的多普勒展宽与钠原子的温度直接相关, 钠原子作为示踪物, 其温度与大气背景温度相同, 从而可利用荧光的多普勒展宽得到中间层顶区域大气温度. 文献[7,17,26]详细给出了钠荧光多普勒激光雷达测量大气风场和温度的原理, 下面简要给出其测温的原理.

在钠荧光多普勒激光雷达中, 使用钠 D_2 线进行测量. 钠原子 D 线跃迁能级分布图如图 1 所示. 图 1 中, $3^2p_{3/2}\rightarrow 3^2s_{1/2}$, 形成 D_2 线, 波长为 589.158 nm. 对于 D_2 线的超精细结构, $3^2p_{3/2}$ 又分裂为 4 个能级.

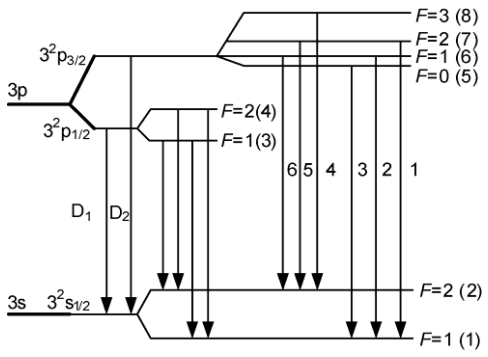

图 1 钠原子 D 线跃迁能级分布图

中间层顶的钠原子多普勒展宽与绝对温度的平方根成正比, 与原子质量的平方根成反比, 可以表示为

$$\sigma_{\mathrm{D}}=\sqrt{\frac{k_{\mathrm{B}}T}{M\lambda_0^{\,2}}}, \tag{1}$$

其中 k_{B} 是波尔兹曼常数, T 是温度, M 是原子质量, λ_0 是中心波长.

钠原子 D_2 线多普勒展宽线型可以表示为[6,7]

$$g(\nu)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\mathrm{D}}}\sum_{n=1}^{6}A_n\exp\left(-\frac{\left[\nu_n-\nu\left(1-\frac{\nu_R}{c}\right)\right]^2}{2\sigma_{\mathrm{D}}^2}\right), \tag{2}$$

σ_{D} 为多普勒展宽的均方根宽度, ν_n 表示第 n 条谱线的相对频率, ν 为频率, A_n 表示第 n 条谱线的相对强度, ν_R 为钠原子的视线速度, c 为光速. D_2 线超精细结构的主要参数见表 1.

发射激光激发钠原子产生共振荧光, 共振荧光的线型是原子多普勒展宽线型与激光线型 $g_{\mathrm{L}}(\nu)$卷积的结果, 可以表示为

$$G(\nu)=\int g(\nu-\nu')g_{\mathrm{L}}(\nu')\mathrm{d}\nu', \tag{3}$$

激光线型 $g_{\mathrm{L}}(\nu)$一般是宽度为σ_{L} 的高斯线型, 这里激光的线宽约为 140 MHz, 需要实际测量.

由(2)和(3)式知, 大气温度决定钠荧光的宽度, 视线风速决定其多普勒频移. 视线风速为 0, 不同温度时, 钠荧光谱线如图 2.

发射 3 个频率的窄线宽激光, 获得 2 个独立的回波强度比值, 可以将谱线的宽度和多普勒频移同时测量出来, 从而同时获得大气温度和视线风速, 该技

表 1 钠原子 D_2 线超精细跃迁参数[6]

谱线	跃迁 n	频率偏移(GHz) ν_n	相对线强度 A_n
D_{2b}	1	1.0911	5/32
	2	1.0566	5/32
	3	1.0408	2/32
D_{2a}	4	–0.6216	14/32
	5	–0.6806	5/32
	6	–0.7150	1/32

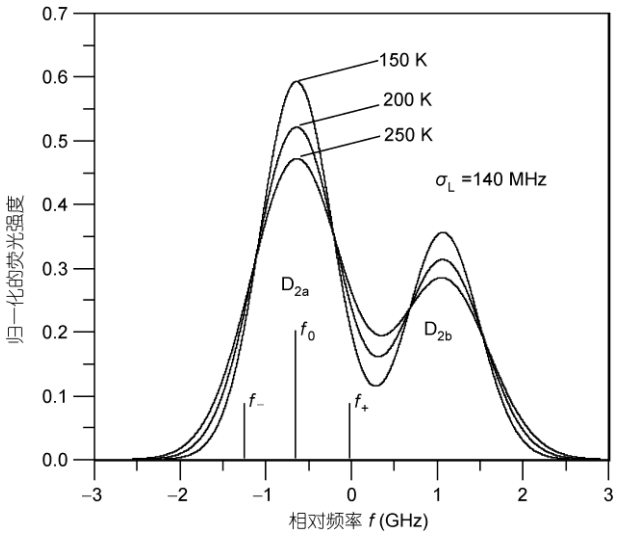

图 2　不同温度时的钠原子荧光光谱

术称为三频多普勒技术[7,17,26]. 中国科学院空间科学与应用研究中心的激光雷达使用 3 个频率(f_0, f_+, f_-)分别位于 D_{2a} 谱线的峰值处和两翼, $f_+ = f_0$+630 MHz, $f_- = f_0$−630 MHz. D_{2a} 谱线上 3 个频率(f_0, f_+, f_-)处的大气回波荧光强度为 $N(f_0)$, $N(f_+)$, $N(f_-)$. 定义比值 R_T 如下:

$$R_T = \frac{N(f_+) + N(f_-)}{N(f_0)}, \tag{4}$$

比值 R_T 与大气温度 T 的对应关系如图 3 所示. 这样, 通过测量比值 R_T, 由图 3 获得大气温度.

利用上述三频率的比值测量视线风速的原理和公式在文献中有详细的描述, 这里不再具体介绍.

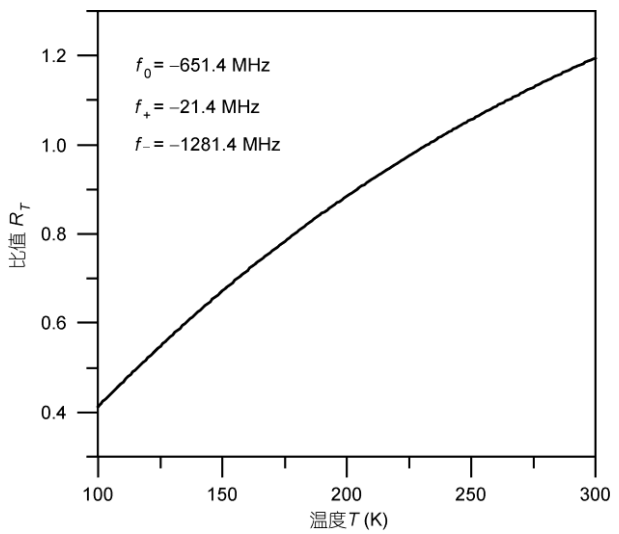

图 3　比值 R_T 随温度 T 的变化

2　钠荧光多普勒激光雷达系统

中国科学院空间科学与应用研究中心的钠荧光多普勒激光雷达, 主要包括发射系统、接收系统、数据采集与控制系统以及数据处理系统等, 如图 4.

发射系统主要获得频率稳定、窄线宽的 3 个频率的脉冲激光束. 首先, 使用窄线宽的环形染料激光器, 通过双折射滤光片、Fabry-Perot 标准具组等选模后, 输出连续激光束, 激光器使用了 Pound-Drever-Hall 稳频技术, 其线宽~100 kHz. 激光的频率会因环境温度等因素的变化而漂移. 为了消除激光频率的漂移, 将激光的频率稳定在钠原子荧光光谱 D_{2a} 峰值处, 研发了钠原子无多普勒饱和荧光光谱锁频技术[27,28]. 为了获得上述 3 个频率(f_0, f_+, f_-)的激光, 研发了移频系统. 在移频系统中, 使用两个声光移频器, 一个使激光频率改变+630 MHz,一个改变−630 MHz. 最后, 采用脉冲染料放大器, 对移频系统输出的激光进行放大, 输出 30 Hz, ~1 W 的脉冲激光.

接收系统使用卡塞格林(Cassegrain)望远镜收集大气散射回来的光子, 经光学滤波器滤除背景光后被光电倍增管探测. 接收系统目前采用 1 个 40 cm 口径的望远镜接收来自垂直方向的回波. 下一步将采用 3 个 1 m 口径的望远镜分别接收来自垂直方向、天顶偏东 20°、天顶偏北 20°等 3 个方向的回波信号, 以便于同时获取 3 个方向上的温度和视线风速数据, 以及最后合成三维风场数据.

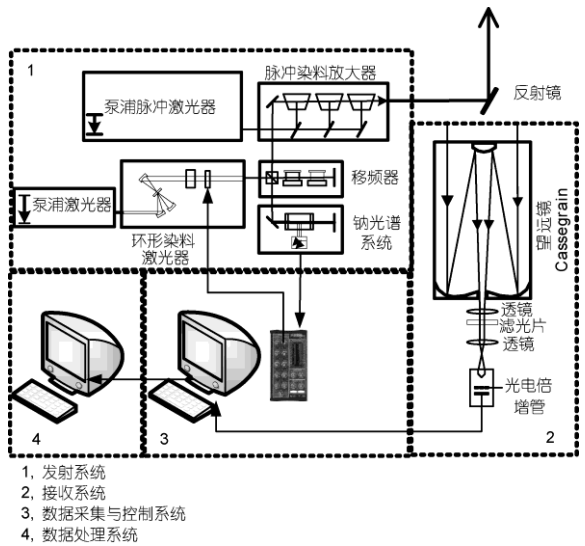

图 4　钠荧光多普勒激光雷达系统结构图

数据采集与控制系统采用光子计数卡采集光电倍增管输出的信号和时序控制器控制移频系统、激光器、光子计数卡等的工作顺序.

数据处理系统利用采集到的激光雷达回波信号反演大气参数.

目前的钠荧光多普勒激光雷达系统技术参数见表 2.

3 观测结果及与 TIMED/SABER 结果的比较

我们利用该激光雷达在北京(40.0°N, 116.3°E)开展了观测实验. 2009 年 10 月, 我们首次成功获得了来自中间层顶的钠层的荧光信号. 之后, 通过多次观测实验, 成功获得了大气温度和风场数据, 下面给出部分典型测量结果.

图 5 是 2010 年 1 月 12 日 01:29(北京时间, 下面提到的时间均为北京时间)的激光雷达回波光子数廓线, 积分时间为 3 min. 3 个激光频率通道: f_0, f_+和 f_-, 其中 f_0通道的信号最强, 大约是其他 2 个通道的 2.5 倍. 从该图看到, 此时钠原子主要分布在 80~105 km 范围内.

图 6 给出了利用图 5 的回波信号反演获得的大气温度廓线和钠原子密度廓线. 图 6(a)中细实线为激光雷达温度, 横线为该高度上温度的测量误差. 图 7 给出了 2010 年 1 月 13 日 03:28 观测的大气温度和钠原子密度廓线. 图 8 给出了 2010 年 4 月 3 日 00:05 观测的大气温度和钠原子密度廓线.

图 6~8 的大气温度和钠原子密度的量级与先验知识符合, 大气温度随高度变化的趋势, 以及明显的扰动现象, 都与我们了解的中间层顶大气波动过程相符合. 作为比较, 图 6~8 同时给出了大气模式 MSISE00 的温度廓线. MSISE00 大气经验模型是在长时间的观测数据基础上建立起来的, 描述了从地面到热层高度范围内的中性大气密度、温度等大气物理性质. 从图 6(a)~8(a)发现, 激光雷达温度与模式温度量值和随高度变化的趋势一致, 但是也存在差异, 尤其是图 7(a)中, 激光雷达温度在 80 km 附近有一个明显的强逆温层现象, 而模式只是气候背景下的温度(没有逆温层现象), 差别较大. 激光雷达温度与模式温度的差别很容易理解, 因为模式温度代表的是气候统计平均的结果, 而激光雷达温度代表的是大气的瞬时真实状态.

为了进一步验证测量结果的可靠性, 我们将激光雷达温度结果与美国的热层-电离层-中间层能量和动力学卫星 TIMED(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics)观测结果进行比较. TIMED 卫星上的宽带辐射计 SABER(Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry)可以测量中间层和低热层区的压强和温度等. 它通过临边扫描方式测量 15 和 4.3 μm 处 CO_2 辐射光谱反演得到大气温度, 在 80~100 km 高度范围内, 其测量误差约为 4~5 K[29,30]. TIMED/SABER 与美国钠荧光多普勒激光雷达的对比研究结果表明, 在 90~97 km 范围内其差别小于 5~10 K[30,31].

我们找到在时间和空间上尽量与激光雷达观测匹配的数据, 为了便于比较, 在图 6(a), 7(a)和 8(a)中以粗虚线给出. 图 6(a)中, SABER 的观测时间为北京时间 20:33:54, 观测点坐标为 41.0°N, 127.1°E, 与激光雷达观测时间相差约 4.9 h, 距离相差约 918 km. 从图中可以看出两者的观测结果基本吻合, 温度廓线都有明显的波动.

图 7(a)中, SABER 的观测时间为北京时间

表 2 钠荧光多普勒激光雷达系统参数

名称	数值
激光波长	589.158 nm
调制频率	±630 MHz
激光平均功率	~1 W
激光重复频率	30 Hz
激光脉冲长度	~7 ns
激光发散角	~1 mrad
望远镜口径	40 cm

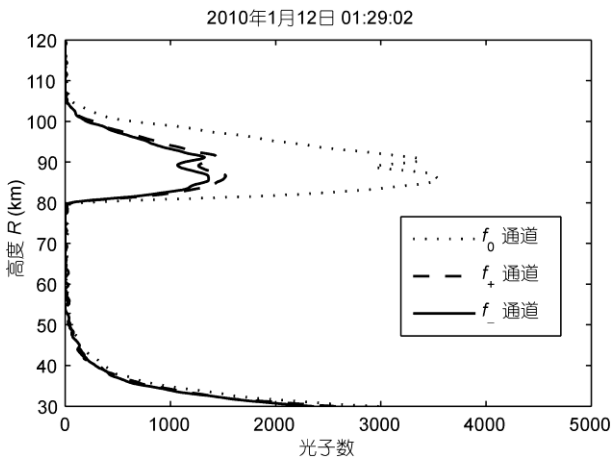

图 5 钠荧光多普勒激光雷达回波信号

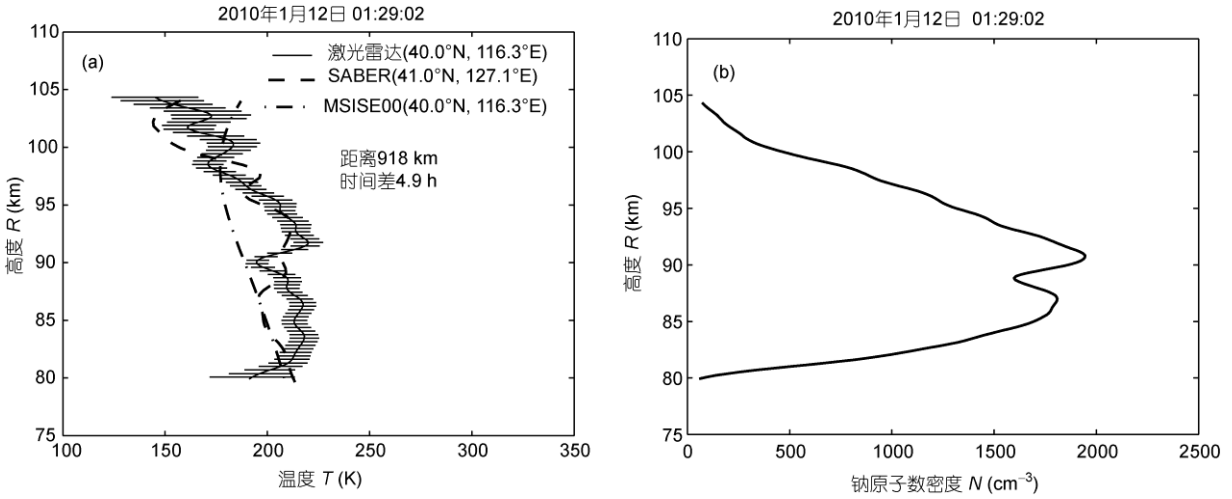

图 6　2010 年 1 月 12 日北京时间 01:29 观测的结果

(a) 温度; (b) 钠原子数密度

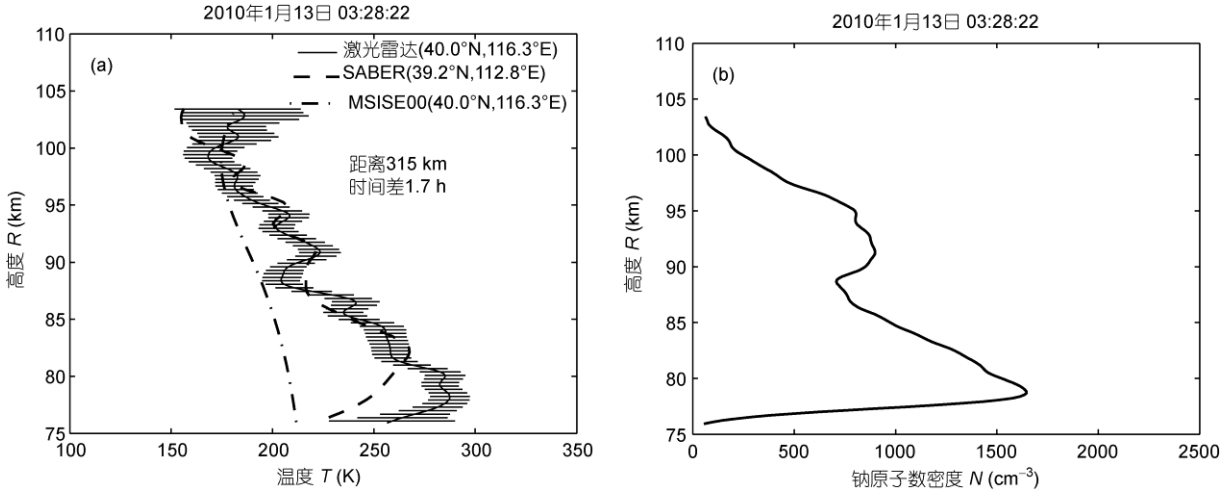

图 7　2010 年 1 月 13 日北京时间 03:28 观测的结果

(a) 温度; (b) 钠原子数密度

01:47:18, 坐标为 39.2°N, 112.8°E, 与激光雷达观测时间相差约 1.7 h, 距离相差约 315 km. 在 81~100 km 范围内, 两者具有较好的一致性. 对于 76~81 km 以及 100~103 km, 激光雷达结果比 SABER 结果偏大. 100~103 km 激光雷达信号较弱, 激光雷达测量误差比较大. SABER 数据显示, 76~81 km 区域出现一个逆温层; 激光雷达数据显示该逆温层的高度要更低一些. 图 7(b)中钠原子数密度峰值此时出现在 79 km 左右, 在 76~79 km 的范围内钠原子数密度急剧变化, 与钠的化学过程有关. 同样, 该廓线上温度波动现象比较明显.

图 8(a)中, SABER 的观测时间为北京时间 00:05:48, 坐标为 40.5°N, 115.3°E, 与激光雷达观测时间相一致, 距离相差约 105 km. 从图中可以看出两者的观测结果基本吻合. 但是, 在 97 km 处, SABER 的温度达到最低 151 K, 比激光雷达测量结果低 33 K.

从上面 3 次的比较来看, 钠荧光多普勒激光雷达与 TIMED/SABER 观测结果基本一致. 对 SABER 和激光雷达数据偏差的统计得到, 其平均偏差为 7 K, 标准偏差为 15 K (图 9).

由于 SABER 数据和激光雷达数据的时间、空间上存在差异, 同时它们的水平分辨率上存在大的不同(激光雷达数据的水平分辨率为~100 m, SABER 数据的水平分辨率为 200~300 km), 进一步考虑到各种

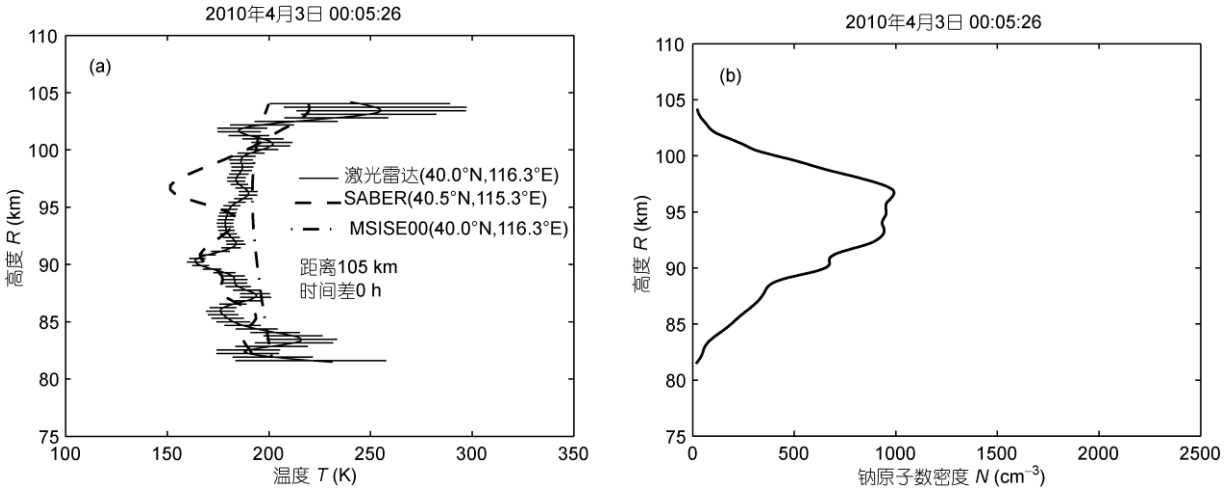

图 8 2010 年 4 月 3 日北京时间 00:05 观测的结果

(a) 温度; (b) 钠原子数密度

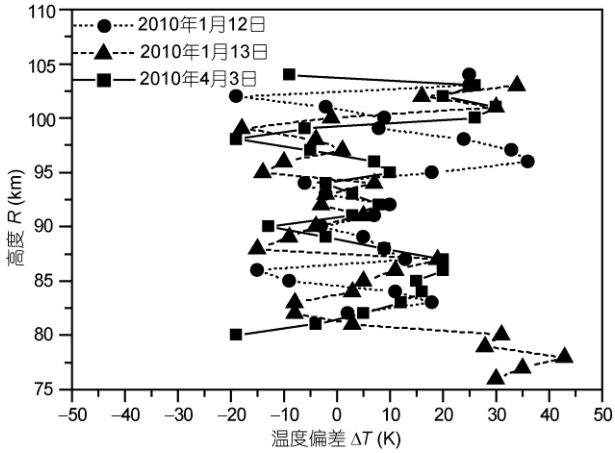

图 9 激光雷达与 TIMED/SABER 观测结果偏差

大气重力波、潮汐波活动的影响, 它们之间的温度偏差是可以理解的.

4 总结

研发了我国第一台钠荧光多普勒激光雷达, 在北京地区开展了中间层顶区域大气环境参量探测试验, 成功获得了大气温度、钠原子密度廓线等参量. 通过将其温度结果与 TIMED/SABER 温度结果进行比较, 结果显示两者符合较好, 验证了激光雷达测量结果的合理性和可靠性.

目前, 我们正对该激光雷达进行升级, 将采用 3 台口径 1 m 的望远镜和原子滤光器技术, 以实现三维风场/温度的全天时观测. 该激光雷达具有多参量同时探测的强大功能, 可应用于大气重力波活动特征研究[32,33]、大气不稳定性探测研究[34,35]等, 对于我国中高层大气以及临近空间环境的探测研究具有重大的意义.

致谢 感谢美国科罗拉多州立大学 SHE Chiao-Yao 教授, 美国科罗拉多大学 CHU XinZhao 教授以及美国伊利诺伊大学 Gardner Chester S 教授、LIU ZhuangRen 博士等在我们建立钠荧光多普勒激光雷达系统过程中给予的帮助.

参考文献

1 Weitkamp C, Walther H. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Singapore: Springer, 2005
2 Shibata T, Kobuchi M, Maeda M. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with a XeF lidar. Appl Opt, 1986, 25: 685–688
3 吴永华, 胡欢陵, 胡顺星, 等. 瑞利散射激光雷达探测平流层和中间层低层大气温度. 大气科学, 2002, 26: 23–29
4 Keckhut P, Chanin M L, Hauchecorne A. Stratosphere temperature measurement using Raman lidar. Appl Opt, 1990, 29: 5182–5186
5 吴永华, 李陶, 周军, 等. Raman 激光雷达探测对流层中上部大气温度分布. 大气科学, 2002, 26: 702–708
6 She C Y, Yu J R, Latifi H, et al. High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesospheric sodium temperature measurements. Appl Opt, 1992, 31: 2095–2106

7 Fujii T, Fukuchi T. Laser Remote Sensing. Boca Raton: CRC Press, 2005

8 Hua D X, Uchida M, Kobayashi T. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere. Appl Opt, 2005, 44: 1305–1314

9 闫召爱. 基于碘分子滤波器的大气测温激光雷达的研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2007

10 Theopold F A, Bösenberg J. Differential absorption lidar measurements of atmospheric temperature profiles: Theory and experiment. J Atmos Ocean Tech, 1993, 10: 165–179

11 Gardner C S. Performance capabilities of middle-atmosphere temperature lidars: Comparison of Na, Fe, K, Ca, Ca^+, and Rayleigh systems. Appl Opt, 2004, 43: 4941–4956

12 Bowman M R, Gibson A J, Sandford M C W. Atmospheric sodium measured by a tuned Laser Radar. Nature, 1969, 221: 456–457

13 Gibson A J, Thomas L, Bhattachacharyya S K. Laser observations of the ground-state hyperfine structure of sodium and of temperatures in the upper atmosphere. Nature, 1979, 281: 131–132

14 Fricke K H, Zahn U. Mesopause temperatures derived from probing the hyperfine structure of the D_2 resonance line of sodium by lidar. J Atmos Terr Phys, 1985, 47: 499–512

15 She C Y, Latifi H, Yu J R, et al. Two-frequency Lidar technique for mesospheric Na temperature measurements. Geophys Res Lett, 1990, 17: 929–932

16 Bills R E. Iron and Sodium Doppler/temperature lidar studies of the upper mesosphere. Dissertation for the Doctoral Degree. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1991

17 She C Y, Yu J R. Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region. Geophys Res Lett, 1994, 21: 1771–1774

18 White M A. A frequency-agile Na lidar for the measurement of temperature and velocity in the mesopause region. Dissertation for the Doctoral Degree. Fort Collins: Colorado State University, 1999

19 She C Y, Sherman J, Yuan T, et al. The first 80-hour continuous lidar campaign for simultaneous observation of mesopause region temperature and wind. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1319–1323

20 Acott P E. Mesosphere momentum flux studies over Fort Collins CO(41°N, 105°W). Dissertation for the Doctoral Degree. Fort Collins: Colorado State University, 2009

21 程学武, 宋娟, 李发泉, 等. 双波长高空探测激光雷达技术. 中国激光, 2005, 33: 1–7

22 Yi F, Zhang S D, Zeng H J, et al. Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N, 114.4°E). Geophys Res Lett, 2002, 29: 1345–1348

23 Dou X K, Xue X H, Chen T D, et al. A statistical study of sporadic sodium layer observed by sodium lidar at Hefei(31.8°N, 117.3°E). Ann Geophys, 2009, 27: 2247–2257

24 Yi F, Zhang S D, Yu C M, et al. Simultaneous observations of sporadic Fe and Na layers by two closely colocated resonance fluorescence lidars at Wuhan(30.5°N, 114.4°E), China. J Geophys Res, 2007, 112: D04303

25 徐丽, 胡雄, 闫召爱, 等. 钠多普勒激光雷达大气参数反演方法. 红外与激光工程, 2009, 38: 140–143

26 徐丽, 胡雄, 程永强, 等. 钠多普勒激光雷达回波光子数仿真及大气参数反演. 地球物理学报, 2010, 53: 1520–1528

27 闫召爱, 胡雄, 郭商勇, 等. 钠原子 D_2 线无多普勒饱和荧光光谱的测量. 光学学报, 2010, 30: 1036–1040

28 Yan Z A, Hu X, Guo S Y, et al. Long term laser frequency stabilization for application in sodium resonance fluorescence Doppler lidar. Proc SPIE, 2009, 7382: 738232

29 陈洪滨. 中高层大气研究的空间探测. 地球科学进展, 2009, 24: 229–241

30 Xu J Y, She C Y, Yuan W, et al. Comparision between the temperature measurements by TIMED/SABER and lidar in the midlatitude. J Geophys Res, 2006, 111: A10S09

31 Mertens C J, Russell Ⅲ J M, Mlynczak M G, et al. Kinetic temperature and carbon dioxide from broadband infrared limb emission measurements taken from the TIMED/SABER instrument. Adv Space Res, 2009, 23: 15–27

32 Hu X, Liu A, Gardner C, et al. Characteristics of quasi-monochromatic gravity waves observed with a lidar in mesopause region at Starfire Optical Range, NM. Geophys Res Lett, 2002, 29: 22-1–22-4

33 Hu X, Gardner C, Liu A, et al. Propagation directions of the mesospheric monochromatic inertial gravity waves observed with a lidar at SOR, NM. Proc SPIE, 2003, 4893: 237–244

34 Liu A, Roble R G, Hecht J H, et al. Unstable layers in the mesopause region observed with Na lidar during the turbulent oxygen mixing experiment (TOMEX) campaign. J Geophys Res, 2004, 109: D02S02

35 涂翠, 胡雄, 闫召爱, 等. 中国首次中层顶大气重力波成像观测实验. 科学通报, 2009, 54: 3784–3789