

文章编号: 0253-2239(2006)09-1281-6

新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽*

谢晨波 周 军 岳古明 戚福弟 范爱媛

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 水汽体积比仅仅占整个空气的 0.1%~3%,但它却是大气中时空变化最为活跃的气体。拉曼激光雷达由于其测量精度高、探测范围广以及自动化程度高,成为现今测量大气水汽含量的新型工具。介绍了中国科学院安徽光学精密机械研究所于 2004 年 10 月自行研制的国内首台车载式拉曼激光雷达的总体结构和主要技术参量,给出其相应激光雷达数据的反演方法,该激光雷达在合肥地区进行了实际测量和对比实验。测量结果显示:该激光雷达夜晚探测水汽的高度范围可以从近地面到达对流层中部 8 km 左右。同时,该激光雷达还尝试进行了白天水汽探测实验,并首次得出突变层内的水汽混合比垂直廓线。

关键词: 大气光学; 水汽; 气溶胶; 拉曼-米氏散射激光雷达

中图分类号: TN249 文献标识码: A

New Mobile Raman Lidar for Measurement of Tropospheric Water Vapor

Xie Chenbo Zhou Jun Yue Guming Qi Fudi Fan Aiyuan

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: The content of water vapor in atmosphere is very little and the volume ratio of moisture to air is about 0.1%~3%, but water vapor is the most active molecule in atmosphere. Due to advantages of the high resolution, wide range and highly automatic operation, the Raman lidar has become the useful new-style tools to measure water vapor. The new mobile home Raman lidar developed firstly by Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences in Oct. 2004, is introduced as well as its structure and specification. Process method of the lidar data is described. The practical and comparative experiments were made over Hefei city. The measurement results show that this lidar has ability to gain profiles of water vapor mixing ratio from surface to the height of about 8 km in nighttime. Meanwhile, the measurement of water vapor in daytime has been taken, and the profiles of water vapor mixing ratio in boundary layer have been detected.

Key words: atmospheric optics; water vapor; aerosol; Raman-Mie scattering lidar

1 引 言

大气中的水汽主要来自于水面的蒸发。水汽在大气中的含量虽然很少,但却是时空变化最为活跃的一种气体成份。它是生成云和降雨必不可少的因子,对天气和气候的变化有着重要的影响^[1]。水汽在红外波段(0.7 μm 、0.8 μm 、0.94 μm 、1.1 μm 、1.38 μm 、1.87 μm 、2.7 μm 和 3.2 μm)有许多吸收带,它能够吸收相当一部分太阳辐射能,从而使它成为平衡地气系统辐射收支的一个重要因素。同时水汽对于激光在大气中的传输也起了不可忽视的作用。另外,在大气动力学、气象学、全球水文循环和

大气化学等有联系的一系列大气过程中,水汽也扮演了很重要的角色。而水汽的这些重要影响又与其含量及其垂直分布特征有着密切的关系^[2]。

发展光学探测手段是大气探测研究领域十分重要的工作^[3~5],而激光雷达技术则是其中一项主要内容^[6~9]。作为激光雷达的一种类型,拉曼(Raman)激光雷达主要是根据拉曼散射频移只取决于散射分子的成份,与入射光波长无关的特点,由拉曼散射回波强度的大小确定大气中各种气体成份的浓度。早在 20 世纪 60 年代末期, Melfi^[10] 和 Cooney^[11] 等就首先论证了利用拉曼光谱技术探测

* 国家 863 计划项目资助课题。

作者简介: 谢晨波(1976~),男,安徽霍山人,博士研究生,主要从事激光雷达大气遥感与环境监测方面的研究工作。

E-mail: cbxie@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2005-04-11; 收到修改稿日期: 2005-11-10

大气中的水汽垂直分布的可行性。自那时以来,随着激光技术和弱信号探测技术的发展,拉曼激光雷达探测水汽的能力逐渐提高。拉曼激光雷达不论是在探测水汽的高度、空间和时间分辨率,还是在测量精度上的迅速发展,显示了它在捕获水汽的空间结构和随时间变化特征等方面具有优越的能力。因此,拉曼激光雷达作为探测大气中水汽含量垂直分布的一种重要手段,近十几年中在气象、气候、辐射和环境等研究领域得到了广泛的应用^[12~14]。

为增加激光雷达的机动性和探测范围,中国科学院安徽光学精密机械研究所于2004年10月自行研制成功国内首台车载式拉曼-米氏散射激光雷达系统(简称RML激光雷达),可用于对大气水平能见度^[15]、对流层大气气溶胶和水汽垂直分布的探测。本文主要对其水汽探测功能进行描述,首先给出拉曼-米氏散射激光雷达的总体结构和主要技术

参量,然后介绍反演水汽的激光雷达数据处理方法,最后对拉曼-米氏散射激光雷达在合肥地区的水汽探测典型结果进行分析和讨论。

2 拉曼-米氏散射激光雷达总体结构和技术参量

激光雷达发射的激光在大气中传输时,会与大气中的氮气分子和水汽分子产生拉曼散射作用,通过接收和测量它们的拉曼后向散射光信号,便可以获取水汽混合比的垂直廓线。表1和图1分别给出了拉曼-米氏散射激光雷达的结构示意图和其主要技术参量。从图中可以看出,拉曼-米氏散射激光雷达主要有三部分组成:激光发射单元、信号接收与探测单元以及数据采集和控制单元。

表1 拉曼-米氏散射激光雷达的主要性能指标

Table 1 Specification of RML lidar system

Transmitter optics	Receiver optics	Data acquisition and control
Nd:YAG laser (Continuum Powerlite8020)	Telescope: Cassegrain type (Meade Lx200GPS)	PMT: EMI9813B×2
Wavelength /nm: 355	Diameter /m: 0.4	Quantum efficiency /%: >25
Pulse energy /mJ: 300	Focal length /m: 4	Amplifier: VT120B×2
Stability /%: ±4.0	Field of view /mrad: 0.5~3	Gain: 200
PRF /Hz: 20	Filter: Barr Inc.	Bandwidth /MHz: 350
Divergence /mrad: <0.45	Bandwidth /nm: 4.5@386.7&407.8	Data acquisition: MCS-pci×2
Pulse width /ns: 6~8	Transmission /%: >30@386.7&407.8	Sample rate /MHz: 150
Expander: ×3		Resolution /ns: 200
		PC: WS-855

拉曼-米氏散射激光雷达的激光发射单元主要包括激光器和发射镜片组。在工控机运行控制程序的指令下,Nd:YAG激光器Powerlite8020以20 Hz的重复频率发射355 nm激光。在激光器出光口的第一块分色片将85%的355 nm激光反射到水汽高层发射通道,通过三倍扩束镜最终垂直发射到大气中,用于高层水汽的测量;剩余15%的355 nm波长激光通过水汽低层发射通道,由望远镜转轴上的反射镜发射到大气中,用于低层水汽的测量。

发射到大气中的激光与水汽和氮气分子分别发生拉曼散射,其回波光信号(包括水汽拉曼散射407.8 nm与氮气拉曼散射386.7 nm)全部被φ400 mm的Lx200GPS型号望远镜接收。接收的回波光信号首先经过遮光筒、0.3~3 mrad可调视场光阑和目镜,然后分色镜1将407.8 nm与386.7 nm的回波光信号全部反射到水汽探测通道。激光雷达后继光路中遮光筒和可调视场光阑的主要

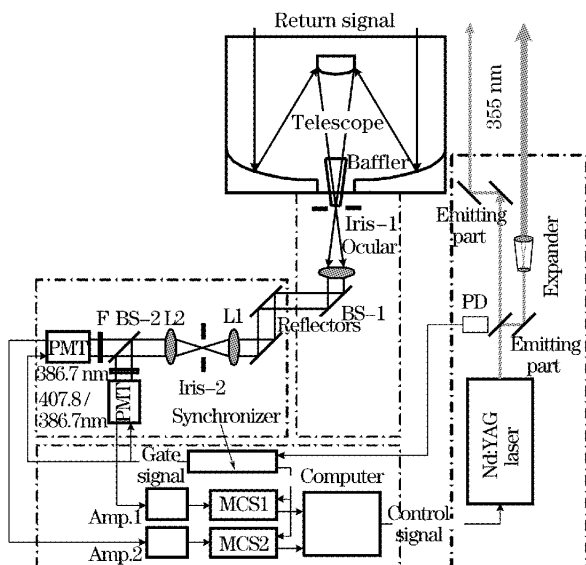


图1 拉曼-米氏散射激光雷达的结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of RML lidar system

作用都是限制望远镜的接收视场,减少进入雷达接收单元的背景杂散光辐射,尤其是在白天探测情况下。水汽探测通道的 386.7 nm 和 407.8 nm 两束回波光信号首先经过两块对接镜,然后经过一比一的透镜组和对光光阑,最后分色镜 2 将 407.8 nm 和 386.7 nm 回波光信号分开,各自再通过相应的截止片、衰减片和滤光片,被带风冷装置的常开型 EMI9813B 光电倍增管探测。其中,两块对接镜都镀有合适的反射膜层,仅仅将 386.7 nm 和 407.8 nm 波长间的光信号高反,而对于其它波长则高透,以进一步抑制有用信号外的背景辐射信号。透镜组和对光光阑除了满足拉曼-米氏散射激光雷达水汽测量的对光要求外,还可以将接收视场内的回波光信号束缚在水汽后继光路中,避免挡光现象的发生。此外,为有效消除两通道间由于雷达几何因子引起的近距离信号偏差,分色镜 2 还反射 12% 的 386.7 nm 光信号进入 407.8 nm 通道以便测量两通道间的订正常数。

拉曼-米氏散射激光雷达数据采集和控制单元主要包括:放大器,光子计数卡以及主波门控控制器。该激光雷达采用前置放大器的放大倍数为 200 倍,最大带宽为 350 MHz,噪声仅为 20 μ V,保证能够将光电倍增管输出的弱信号线性放大以满足光子计数卡的输入要求。光子计数卡的型号为标准 PCI 插槽式,其具有甄别、计数和平均综合功能,最大计数率为 150 MHz,保证探测过程中高脉冲分辨率的要求。由于对流层水汽和氮气的回波信号动态范围较大,因此拉曼-米氏散射激光雷达采用高低分层的数据采集方法,即利用光电倍增管的门控功能分时对近距离(3 km 以下)和远距离(1~2 km 以上)的水汽和氮气进行探测,然后将两条廓线拼接为一条完整的回波信号廓线。主波门控控制器主要有主波控制电路、光电倍增管门控控制电路和主控工控机以及操作程序软件组成,确保拉曼-米氏散射激光雷达激光发射、回波信号接收、数据采集、传送和存储步调一致地工作。

3 拉曼-米氏散射激光雷达数据处理方法

激光雷达接收到的水汽分子和氮气分子的拉曼后向散射回波光信号分别表示如下^[14]:

$$S_H(z) = \frac{k_H}{z^2} \sigma_H(\pi) n_H(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_H, z_0, z), \quad (1)$$

$$S_N(z) = \frac{k_N}{z^2} \sigma_N(\pi) n_N(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_N, z_0, z), \quad (2)$$

式中 $S_H(z)$ 与 $S_N(z)$ 分别为高度 z 处水汽和氮气拉曼后向散射回波光信号; $\lambda_0, \lambda_H, \lambda_N$ 分别为发射激光波长、水汽和氮气的拉曼散射波长; k_H 与 k_N 为激光雷达中水汽和氮气拉曼通道的仪器常数; $\sigma_H(\pi)$ 与 $\sigma_N(\pi)$ 为水汽和氮气分子的拉曼后向散射微分截面; $n_H(z)$ 与 $n_N(z)$ 为高度 z 处水汽和氮气分子的数密度; z_0 为激光雷达所在的高度; $q(\lambda_x, z_0, z)$ 分别表示对应波长 x 在 z_0 至 z 高度范围内的大气透射率。

根据水汽混合比 $w(z)$ 的定义:一定高度 z 处包含在同一体积内的水汽质量 $m_H(z)$ 与干空气质量 $m_{dry}(z)$ 之比,即 $w(z) = m_H(z)/m_{dry}(z)$ 。其数值随高度 z 的分布可表示如下:

$$w(z) = \frac{n_H(z) M_H}{n_{dry}(z) M_{dry}}, \quad (3)$$

式中 $n_H(z)$ 与 $n_{dry}(z)$ 为高度 z 处的水汽和干空气数密度; M_H 与 M_{dry} 分别表示水汽和干空气的分子量。由于在对流层范围内氮气分子数密度与干空气分子数密度的比值 $n_N(z)/n_{dry}(z)$ 是一个常数,约为 78%,所以可以用氮气分子的数密度代替干空气分子数密度。

$$w(z) = \frac{n_H(z) M_H}{n_N(z) M_{dry}} \frac{n_N(z)}{n_{dry}(z)}, \quad (4)$$

这样,水汽混合比就可以利用拉曼激光雷达测量的水汽和氮气分子拉曼后向散射光信号计算获得。将(1)式和(2)式代入(4)式即可得到

$$w(z) = C_H \Delta_q^H(z_0, z) \frac{S_H(z)}{S_N(z)}, \quad (5)$$

$$C_H = \frac{k_N}{k_H} \frac{\sigma_N(\pi)}{\sigma_H(\pi)} \frac{M_H}{M_{dry}} \frac{n_N(z)}{n_{dry}(z)}, \quad (6)$$

$$\Delta_q^H(z_0, z) = \frac{q(\lambda_N, z_0, z)}{q(\lambda_H, z_0, z)}, \quad (7)$$

式中 C_H 为拉曼激光雷达探测水汽混合比的系统标定常数; $\Delta_q^H(z_0, z)$ 为大气透射率修正函数。由(5)式可以看出,如果已知标定常数 C_H ,大气透射率修正函数 $\Delta_q^H(z_0, z)$,通过拉曼激光雷达测量的水汽和氮气拉曼后向散射光信号的比值 $S_H(z)/S_N(z)$ 就可以计算出水汽混合比 $w(z)$ 。

由于拉曼-米氏散射激光雷达低层水汽和氮气回波光信号分别受到近距离不同几何因子的影响,因此必须利用通道订正常数进行校正。假设拉曼-米氏散射激光雷达过渡区内两通道光信号比值为 $S'_H(z)/S'_N(z)$ 、两个通道的几何因子分别为 $\gamma_H(z)$ 和 $\gamma_N(z)$,修正后的光信号比值为 $S_H(z)/S_N(z)$,则

有

$$\frac{S_H(z)}{S_N(z)} = \frac{S'_H(z)/\gamma_H(z)}{S'_N(z)/\gamma_N(z)} = \frac{S'_H(z)}{S'_N(z)} \frac{\gamma_N(z)}{\gamma_H(z)}, \quad (8)$$

从(8)式可以看出,无需知道每个通道具体几何因子的数值,只要确定两通道几何因子的比值 $\gamma_H(z)/\gamma_N(z)$,便可以对近距离水汽和氮气回波光信号的比值 $S'_H(z)/S'_N(z)$ 进行订正。拉曼-米氏散射激光雷达利用两通道同时测量氮气拉曼回波光信号来获取通道订正常数 $\gamma_H(z)/\gamma_N(z)$ 。假设氮气通道 386.7 nm 的拉曼回波光信号和水汽通道 386.7 nm 的拉曼回波光信号分别为 $S_{2N}(z)$ 和 $S_{1N}(z)$,则有

$$\frac{S_{2N}(z)}{S_{1N}(z)} = \frac{K_N \gamma_N(z)}{K_H \gamma_H(z)} = K \frac{\gamma_N(z)}{\gamma_H(z)}, \quad (9)$$

式中 K_N 为氮气拉曼通道的仪器常数, K_H 为水汽拉曼通道的仪器常数, K 为比例常数。假设在 1.5 km 高度,两通道的重叠系数均为 1,即有 $\gamma_H(1.5)/\gamma_N(1.5) = 1$,因此 $S_{2N}(1.5)/S_{1N}(1.5) = K$,将 K 值代入(9)式,即可得到过渡区域内两通道的重叠系数比值为:

$$\frac{\gamma_N(z)}{\gamma_H(z)} = \frac{S_{2N}(z)}{S_{1N}(z)} \frac{S_{1N}(1.5)}{S_{2N}(1.5)}, \quad (10)$$

再将(10)式的结果代回(8)式,即完成了过渡区域内两个通道回波光信号比值 $S'_H(z)/S'_N(z)$ 的修正。

确定大气透射率修正常数的数值大小必须事先知道氮气拉曼波长 386.7 nm 与水汽拉曼波长 407.8 nm 的大气气溶胶消光系数和分子消光系数。文中大气气溶胶消光系数是从拉曼-米氏散射激光雷达测量的 532 nm 波长气溶胶消光系数按 λ^{-1} 的关系转化得到,而它们的分子消光系数则使用 532 nm 波长的美国标准大气中纬度模式按 λ^{-4} 的关系转化而来。

标定常数 C_H 通过气象探空法来确定^[11],即在拉曼激光雷达探测水汽混合比的过程中放一载有气象探空仪的探空气球,将气象探空仪探测的水汽混合比与拉曼激光雷达测得的水汽和氮气分子拉曼散射光信号比值 $S_H(z)/S_N(z)$ 和透射率修正函数 $\Delta_q^H(z_0, z)$ 的乘积进行归一化处理,即可确定标定常数 C_H 。

4 拉曼-米氏散射激光雷达测量水汽结果分析与讨论

拉曼-米氏散射激光雷达探测对流层水汽一般在晴朗无低云的夜晚和白天进行,分为三个阶段。在第一个阶段,将 30000 发水汽高层发射通道的

355 nm 激光脉冲发射到大气中,利用光电倍增管的门控功能采集一定距离以后(1~2 km)的水汽和氮气拉曼散射回波光信号,进行高层水汽的测量;第二阶段,撤销光电倍增管上的门控,利用水汽低层发射通道发射 30000 发 355 nm 激光脉冲,采集低层(<3 km)的水汽和氮气拉曼散射回波光信号,进行低层水汽测量;最后,更换水汽通道的 407.8 nm 滤光片为 386.7 nm 滤光片,再次利用水汽低层发射通道发射 20000 发 355 nm 激光脉冲,采集两通道的氮气拉曼回波光信号以获取通道订正常数,用于拉曼-米氏散射激光雷达过渡区内水汽测量的订正。整个测量过程大约持续一小时左右。拉曼-米氏散射激光雷达测量对流层水汽垂直分布的最小空间分辨力为 30 m。

4.1 夜晚水汽混合比的垂直廓线

图 2 给出了 2004 年 9 月 12 日和 10 月 9 日两个夜晚合肥地区拉曼-米氏散射激光雷达测量的对流层水汽混合比垂直廓线(实线)。为比较起见,图中还一并给出了本所自行研制的 L625 激光雷达(圆点线)和气象探空仪(方点线)探测的水汽混合比。另外,由于气象探空仪的测湿元件肠衣对相对湿度在 20% 以下的测量精度可能难以保证,因此作为参考,图中给出了相对湿度为 20% 的水汽混合比廓线(虚线)。

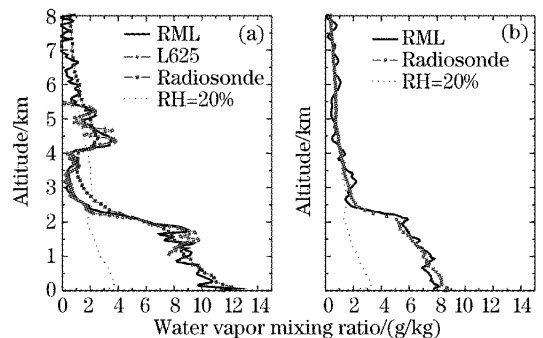


图 2 2004 年 9 月 12 日(a),10 月 9 日(b)夜晚合肥地区水汽混合比廓线

Fig. 2 Profiles of water vapor mixing ratio at night on Setp. 12 (a), Oct. 9 (b) 2004 in Hefei city

首先,对图 2 中的拉曼-米氏散射激光雷达和 L625 雷达测量的水汽混合比廓线进行比较。由于 L625 激光雷达自身的限制,因此其只能对 1 km 以上的水汽进行探测。可以看出,在共同探测高度范围内,两激光雷达的测量数据一致性很好,甚至一些精细的结构都较好地吻合。而在 4 km 高度以上,由于 L625 激光雷达测量回波光信号的信噪比下

降,致使反演数据出现较大振荡,但其整体变化趋势仍然和拉曼-米氏散射激光雷达一致。

其次,对拉曼-米氏散射激光雷达和气象探空仪测量水汽混合比的结果进行对比可以发现,除个别区域外,它们在整个探测高度范围内都具有较好的一致性。而两者间相差较大的区域主要集中在水汽含量较低或水汽变化剧烈的高度范围。这主要可能有以下四种原因:其一,气象探空仪的测湿元件肠衣对湿度的响应速度较慢,从高湿到低湿的突变过程难以快速响应;其二,气象探空仪在相对湿度较小的情况下测量误差增大,在 5% 以下基本上不响应,这就造成了气象探空仪在低湿区域内的测量结果偏大;其三、在高层低湿情况下,激光雷达接收的水汽后向散射光信号较弱,信噪比较低,探测误差也相应的变大;其四,气象探空仪测量的并非完全垂直方向上的水汽混合比,而是具有一定的平移,并且随着高度的增加,其平移量也会变大。此外,两者在测量时间上的不完全一致也会导致两者间出现一定的偏差。

最后,从拉曼-米氏散射激光雷达测量水汽混合比垂直廓线上看出,这两天晚上合肥地区上方水汽均有一突变层,并且突变层的高度每晚不同,大致都在 1.5~3 km 的高度范围。突变层以下的水汽混合比很大,在突变层内水汽混合比急剧减小,突变层以上的水汽混合比一般均在 2 g/kg 以下。同时 9 月 12 日在 4~5.5 km 高度范围出现混合比数值较大的多层水汽结构,而 10 月 9 日突变层以上水汽混合比则平缓衰减,未出现大的水汽结构,这些均反映了大气中水汽含量空间结构的复杂性。

以上这些测量结果不但表明拉曼-米氏散射激光雷达测量对流层水汽混合比数据的正确可靠,而且显示出该激光雷达夜晚的测量范围可以从近地面直到对流层中部 7~8 km 左右高度,可以较为精细地反映水汽在大气中的垂直分布特征。

4.2 云层中的水汽混合比

除了常规水汽探测,拉曼-米氏散射激光雷达还测量云层中的水汽混合比,其结果如图 3 所示。图 3(a)中还同时给出了拉曼-米氏散射激光雷达测量的气溶胶消光系数垂直廓线。一般情况下,气溶胶的消光系数是随着高度的增加而逐渐减小,而该天在 1~1.5 km、2~3.5 km 和 4~5 km 三个高度范围内气溶胶的消光系数都出现不同程度的增加,尤其是最低层消光数值已经达到 0.5 km⁻¹ 以上。这主要是由于云层强烈消光作用的影响。与此对应的是图 3(b)中水汽混合比在以上三个高度也明显

偏大,最低层水汽混合比达到 6.2 g/kg,两者间具有很好的——对应关系。

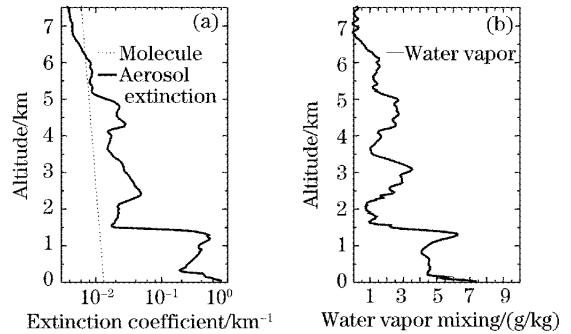


图 3 拉曼-米氏散射激光雷达测量多云天气下气溶胶消光系数(a),水汽混合比(b)

Fig. 3 Profiles of aerosol extinction (a) and water vapor mixing ratio (b) measured by RML lidar in cloudy day

4.3 白天水汽混合比垂直廓线

由于强烈背景光辐射的影响,因此白天探测一直是激光雷达面临的一种挑战。拉曼-米氏散射激光雷达在设计过程中便采取一定的措施,以方便白天水汽混合比的测量,并得出初步探测结果。图 4 中给出的是拉曼-米氏散射激光雷达分别于 2004 年 9 月 29 日下午 17:20 和 20:00 测量的水汽混合比垂直廓线。从中可以看出,该天的水汽突变层的高度大约在 1 km 附近,突变层内的白天测量结果和夜晚较为吻合,少许差别主要是由于测量时间上的不同引起。而突变层以上,由于水汽含量的急剧减少导致雷达接收回波光信号变小,再加上背景辐射的影响,使得反演的水汽混合比数据出现振荡。并且随着高度的增加,该振荡也变得更为剧烈。但即便如此,白天测量数据总体上的变化趋势还是和夜晚较为接近。从白天的初步探测结果不难看出,拉

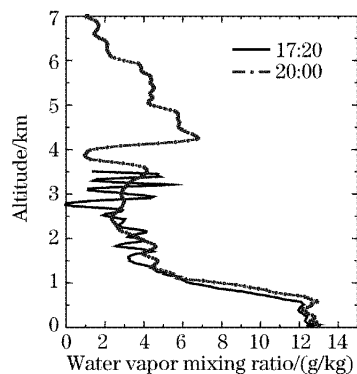


图 4 拉曼-米氏散射激光雷达测量白天水汽混合比垂直廓线

Fig. 4 Vertical Profile of water vapor mixing ratio measured by RML lidar in day time

曼-米氏散射激光雷达已经具备了一定的白天探测能力。但距离整个白天时间上的探测还有很多工作要进行,譬如如何进一步减小激光发散角和望远镜接收视场,减小雷达接收和后继光路对背景辐射的透射率以及采用更窄带宽的滤光片等。

5 结 论

本文详细的介绍了国内首台用于测量对流层水汽混合比的车载式拉曼激光雷达系统——拉曼-米氏散射激光雷达,并利用该激光雷达对合肥地区夜晚和白天的水汽进行观测。实际测量结果显示,拉曼-米氏散射激光雷达与另一台 L625 激光雷达以及气象探空仪同时测量的水汽混合比垂直廓线吻合性较好,证明拉曼-米氏散射激光雷达测量水汽数据的真实可靠;拉曼-米氏散射激光雷达测量水汽的高度范围在夜晚为近地面到 8 km 高度,白天为近地面到大气突变层以上。

参 考 文 献

- 1 Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1990 (in Chinese)
周秀骥,陶善昌,姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京:气象出版社,1990
- 2 Keith P. Shine, Ashok Sinha. Sensitivity of the Earth's climate to height-dependent changes in the water vapour mixing ratio[J]. *Nature*, 1991, **354**: 382~384
- 3 Yan Fengqi, Hu Huanling, Zhou Jun. Measurements of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 855~859 (in Chinese)
阎逢旗,胡欢陵,周 军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚部的测量[J]. 光学学报, 2003, **23**(7): 855~859
- 4 Zhou Bin, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Error analysis in differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 957~961 (in Chinese)
周 斌,刘文清,齐 锋等. 差分吸收光谱法测量大气污染物的测量误差分析[J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 957~961
- 5 Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo. Aerosol pollutant boundary layer measured by lidar at Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 59~66 (in Chinese)
胡欢陵,吴永华,谢晨波. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 59~66
- 6 Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanjia. Polarization lidar observations of cirrus clouds and asian dust aerosols over Hefei[J]. *Chin. J. Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(6): 1093~1100 (in Chinese)
刘 东,戚福弟,金传佳. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003, **27**(6): 1093~1100
- 7 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 Differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 597~601 (in Chinese)
胡顺星,胡欢陵,吴永华等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 597~601
- 8 Zhang Yinchao, Hu Huanling, Tan Kun *et al.*. Development of a mobile lidar system for air pollution monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1025~1031 (in Chinese)
张寅超,胡欢陵,谭 锐等. AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1025~1031
- 9 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Rayleigh-Raman scattering lidar for atmospheric temperature profiles measurements[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 851~856 (in Chinese)
吴永华,胡欢陵,胡顺星. 瑞利-拉曼散射激光雷达探测大气温度分布[J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 851~856
- 10 S. H. Melfi, J. D. Lawrence, M. P. McCormick. Observation of Raman scattering by water vapor in the atmosphere[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**(9): 295~297
- 11 J. A. Cooney. Remote measurements of atmospheric water vapor profiles using the Raman component of laser backscatter[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1970, **9**: 182~184
- 12 S. H. Melfi, D. N. Whiteman, R. A. Ferrare. Observations of atmospheric fronts using Raman lidar moisture measurements [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1989, **28**: 789~806
- 13 A. Ansmann, M. Riebesell, U. Wandinger *et al.*. Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio [J]. *Appl. Phys.*, 1992, **55**: 18~28
- 14 D. N. Whiteman, S. H. Melfi, R. A. Ferrare. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(16): 3068~3082
- 15 Xie Chenbo, Han Yong, Li Chao *et al.*. Mobile lidar for visibility measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(7): 971~975 (in Chinese)
谢晨波,韩 永,李 超等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(7): 971~975