

大气中水汽混合比的 Raman 激光雷达探测^{*}

李 陶 戚福第 岳古明 金传佳
胡欢陵 周 军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 介绍了作者自行研制的 L625 Raman 激光雷达系统的结构和主要技术参数, 叙述了 Raman 激光雷达探测水汽混合比的基本原理和数据处理方法。使用这台激光雷达在合肥地区进行了水汽混合比垂直分布的探测, 对获得的水汽混合比垂直廓线进行了初步的分析和研究。最后就 L625 Raman 激光雷达探测水汽混合比的误差进行了分析和讨论。

关键词: Raman 激光雷达; 水汽混合比; 垂直分布; 探测

1 引言

水汽在大气中的含量虽然很少, 但却是时空变化最活跃的一种气体成分。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。水汽在红外波段有许多吸收带, 它能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。另外, 在与大气动力学、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。水汽的这些重要影响与其含量及其垂直分布特征有着密切的关系^[1]。

Raman 激光雷达根据同时接收到的水汽和氮气分子对激光的 Raman 后向散射回波信号获得水汽混合比的垂直分布。早在 60 年代末期, Melfi^[2]和 Cooney^[3]等人就首先论证了利用 Raman 光谱技术探测大气中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, Raman 激光雷达探测水汽的能力逐渐提高, 尤其进入 90 年代以来, Raman 激光雷达无论在探测水汽的高度、空间和时间分辨率还是在测量精度上都得到了迅速发展, 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, 因此在气象、气候、辐射和环境等研究领域得到了广泛的应用^[4~8]。

我们使用自行研制的 L625 Raman 激光雷达在合肥地区进行了水汽混合比垂直分布的探测。本文介绍了该 Raman 激光雷达系统的结构和技术参数, 叙述了 Raman 激光雷达探测水汽混合比的基本原理及其数据处理方法, 对 Raman 激光雷达探测水汽混合比的结果进行了初步的分析和研究, 并对 Raman 激光雷达探测水汽混合比的误差进行定量的分析和讨论。

2 L625 Raman 激光雷达系统

L625 Raman 激光雷达系统从整体上可分为激光发射系统、信号接收系统、数据采集和控制系统三大部分。图 1 给出了 L625 Raman 激光雷达的结构示意图，表 1 为该激光雷达的主要技术参数。

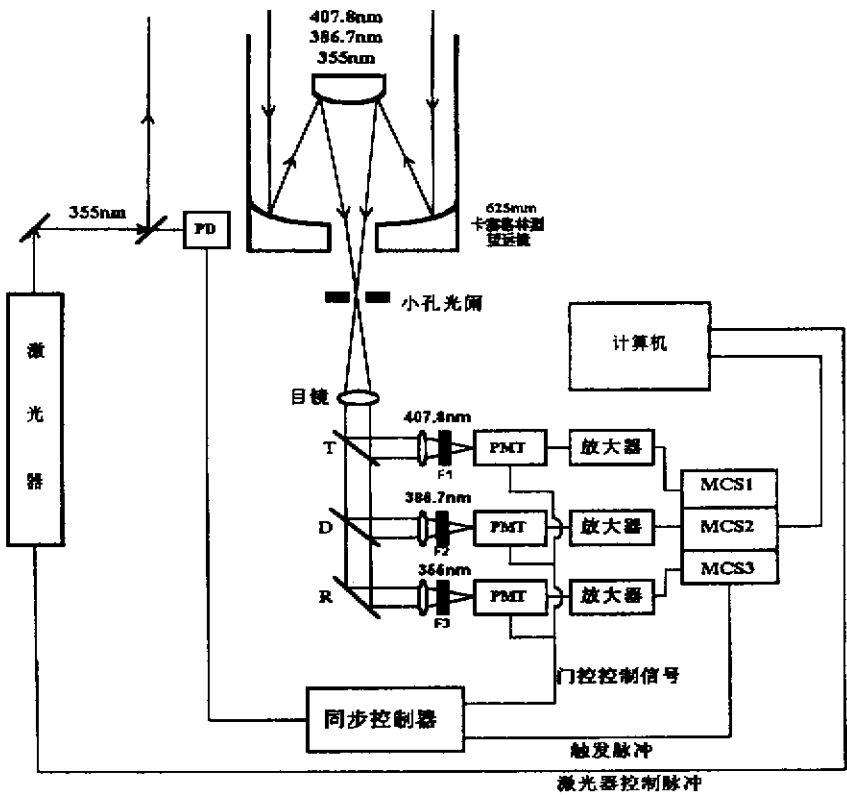


图 1 L625 Raman 激光雷达系统的结构示意图

2.1 激光发射系统

激光发射系统主要包括 Nd:YAG 激光器和激光光束调整装置。Nd:YAG 激光器由闪光灯泵浦的一级振荡器和两级放大器组成，基波 1064 nm 分别通过 BBO 二倍频和三倍频晶体输出 355 nm 波长的激光，其单脉冲能量为 80 mJ，能量的波动范围约为 ± 5 mJ，脉宽为 20 ns，脉冲重复率为 10 Hz。激光光束调整装置由对接镜和 45° 转向镜组成，通过 CCD 监视系统调整对接镜及 45° 转向镜，使激光光束穿过处于实验楼一楼和四楼的在同一垂直线上的两个基准孔中心。由于接收望远镜的光轴已垂直指向，这样的调整保证了发射的激光光束与接收望远镜光轴的平行。

2.2 信号接收系统

信号接收系统由接收光学系统和信号探测系统组成。

表 1 L625 Raman 激光雷达系统的主要技术参数

激光器	Nd:YAG		
工作波长 / nm	355		
脉冲能量 / mJ	80		
脉冲宽度 / ns	20		
光束发散角 / mrad	≤ 1		
脉冲重复频率 / Hz	10		
接收望远镜	卡塞格林型		
直径 / mm	625		
视场角 / mrad	3		
干涉滤光片			
中心波长 / nm	407.8	386.7	355
带宽 / nm)	4.7	4.3	1
透过率 / %	55	60	40
光电倍增管 (EMI)	9214QB×2		9817B
前置放大器 (EG & G)	VT120×3		
增益	200		
带宽 / MHz	350		
多通道光子计数器	EG & G 914P×3		
最大计数率	150 MHz		
主控计算机	Pentium		

接收光学系统包括接收望远镜和后继光学单元。接收望远镜是直径为 625 mm、相对孔径为 $f/7.37$ 的卡塞格林型望远镜 (Cassegrain), 其主副镜均镀有铝膜, 以适应从紫外光到可见光的宽波段接收, 在接收望远镜主副镜组合焦点处安装了可变直径的小孔光阑, 从而使其接收视场角在 0.5~3 mrad 范围内可变。

后继光学单元由目镜、分色片和干涉滤光片组成。目镜由 JGS1 石英玻璃制成, 它将接收望远镜接收到的大气后向散射光变成平行光。

三块分色片以它对三个波长分别具有合适的反射率和透过率而将波长为 407.8 nm 的水汽分子 Raman 后向散射光、波长为 386.7 nm 的氮气分子 Raman 后向散射光以及波长为 355 nm 分子和气溶胶 (Rayleigh-Mie) 后向散射光分别导入相应的探测通道。每块分色片都反射一定强

度的波长为 386.7 nm 光, 这是由于该激光雷达是非同轴系统, 发射的激光光束与接收望远镜的光轴之间的距离为 1.5 m, 因此存在一过渡区域。通过同时测量两个 Raman 通道内氮气分子的 Raman 后向散射信号 (波长为 386.7 nm), 能够获得氮气 Raman 通道重叠系数与水汽 Raman 通道重叠系数的比值。

由于水汽分子和氮气分子的 Raman 后向散射截面比 Rayleigh-Mie 后向散射截面小 3 个数量级左右, 相应的 Raman 回波强度就比 Rayleigh-Mie 散射的回波强度约小 3~4 个量级。因此, 用于接收两个 Raman 后向散射光的干涉滤光片必须对发射激光波长 355 nm 具有很高的截止率, 应达到 10^{-12} , 以保证 Rayleigh-Mie 后向散射光完全被这两块干涉滤光片截止而不能进入光电倍增管。这两个 Raman 通道的干涉滤光片带宽一般选择为 4~5 nm, 可覆盖整个 Raman 散射 Q、S、O 支光谱, 以至于水汽混合比的探测结果对大气温度的变化不灵敏, 同时还可忽略其中心波长随温度的漂移。两个 Raman 通道的干涉滤光片的性能指标如表 2 所示。

表 2 干涉滤光片的性能指标

	水汽 Raman	氮 Raman
中心波长 / nm	407.8	386.7
带宽 / nm	4.7	4.3
中心波长透过率 / %	55	60
透过率 (355 nm 和 532 nm)	10^{-12}	10^{-12}
透过率 (200~1200 nm)	10^{-6}	10^{-6}
透过率 (375、387、580 和 607 nm)	10^{-8}	
直径 / mm	25.4	25.4

信号探测系统包括光电倍增管及其高压电源、致冷器和放大器等。两个用于 Raman 波长探测的光电倍增管是 9214QB，一个用于 Rayleigh-Mie 波长探测的光电倍增管是 9817B。它们都是由英国 EMI 公司生产的线型聚焦型光电倍增管，具有响应快、增益高、线性好和噪声低等优点。为了降低暗电流，提高信噪比，使用了与三个光电倍增管相配套的 FACT50 致冷器（-30℃），三套放大器均采用了美国 EG & G 公司的 VT120 型前置脉冲放大器。

2.3 数据采集和控制系统

数据采集系统使用了美国 EG & G 公司生产的 914P 型多通道累加器（MCS）。它具有甄别器、多通道光子计数器和平均器的综合功能。最大计数率为 150 MHz，保证了探测过程中高脉冲分辨率的要求。

控制系统包括主波控制器、光电倍增管门控控制器和主控计算机及其操作程序软件，它保证了激光发射、回波信号接收、数据采集、传送和存储协调一致地工作。

3 Raman 激光雷达探测水汽混合比的基本方程

在氮气分子的振动—转动 Raman 光谱中， $v = 0 \rightarrow 1$ 跃迁的振动 Raman 频移量为 2331 cm^{-1} ，当激励波长为 Nd:YAG 激光器三倍频输出的 355 nm 波长时，其振动 Raman 光谱的中心波长为 386.7 nm。对于水汽分子^[9]，其振动 Raman 光谱的中心频移量为 3654 cm^{-1} ，当激励波长为 355 nm 时，其 Raman 光谱的中心波长为 407.8 nm。

Raman 激光雷达接收的水汽和氮气 Raman 后向散射回波信号可分别表示为^[6]

$$S_{\lambda_H}(z) = \frac{k_{\lambda_H}}{z^2} \sigma_H(\pi) n_H(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_H, z_0, z), \tag{1}$$

$$S_{\lambda_N}(z) = \frac{k_{\lambda_N}}{z^2} \sigma_N(\pi) n_N(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_N, z_0, z), \tag{2}$$

式中， $S_{\lambda_x}(z)$ ：高度为 z 处波长 λ_x 的回波信号， k_{λ_x} ： x 通道的仪器常数， $\sigma_x(\pi)$ ： x 分子的 Raman 后向散射截面， $n_x(z)$ ：高度为 z 处 x 分子的数密度， z_0 ：Raman 激光雷达所在的高度， $q(\lambda_x, z_0, z)$ ：高度 z_0 和 z 之间的大气透过率，可表示为

$$q(\lambda_x, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_x}(z') dz'\right],$$

$\alpha_{\lambda_x}(z)$ ： λ_x 波长的大气消光系数，下标 x 代表水汽 Raman 参数 H 和氮气 Raman 参数 N， λ_0 为发射激光波长。

水汽混合比 $w(z)$ 定义为某一单位体积内水汽的质量与干空气质量的比值，其随高度 z 的分布可表示如下：

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

式中， $n_H(z)$ 、 $n_{\text{dry}}(z)$ ：高度 z 处的水汽和干空气数密度， M_H 、 M_{dry} ：水汽和干空气的分子量。

由于在大气中氮气的含量稳定, 其体积约占干空气的 78%, 所以可以用氮气的 Raman 后向散射回波信号代替干空气。通过使用 (1) 和 (2) 式, 水汽混合比可以表示为

$$w(z) = C_w \Delta_q''(z_0, z) \frac{S_H(z)}{S_N(z)}, \quad (4)$$

式中, C_w : Raman 激光雷达探测水汽混合比的系统标定常数

$$C_w = \frac{k_N}{k_H} \frac{\sigma_N(\pi)}{\sigma_H(\pi)} \frac{M_H}{M_{\text{dry}}} \frac{n_N}{n_{\text{dry}}},$$

$\Delta_q''(z_0, z)$: 大气透过率修正函数

$$\Delta_q''(z_0, z) = \frac{q(\lambda_N, z_0, z)}{q(\lambda_H, z_0, z)},$$

由 (4) 式可以看出, 如果已知标定常数 C_w , 大气透过率修正函数 $\Delta_q''(z_0, z)$, 通过 Raman 激光雷达测量的水汽和氮气 Raman 后向散射信号的比值 $S_H(z)/S_N(z)$ 就可以计算出水汽混合比 $w(z)$ 。

4 数据处理方法

4.1 过渡区内信号 $S'_H(z)/S'_N(z)$ 的修正

如前所述, 由于本激光雷达存在一过渡区, 必须对两个 Raman 通道在过渡区内的回波信号 $S'_H(z)$ 和 $S'_N(z)$ 进行重叠系数修正, 修正方法如下:

$$\frac{S_H(z)}{S_N(z)} = \frac{S'_H(z)/\gamma_H(z)}{S'_N(z)/\gamma_N(z)} = \frac{S'_H(z)}{S'_N(z)} \cdot \frac{\gamma_N(z)}{\gamma_H(z)}, \quad (5)$$

式中, $S_H(z)/S_N(z)$: 过渡区内回波信号修正后的比值, $\gamma_N(z)/\gamma_H(z)$: 氮 Raman 通道对水汽 Raman 通道重叠系数的比值。

如 2.2 节中所述, $\gamma_N(z)/\gamma_H(z)$ 可通过同时测量氮 Raman 通道和水汽 Raman 通道的波长为 386.7nm 的回波信号获得:

$$\frac{S_{2N}(z)}{S_{1N}(z)} = \frac{K_N}{K_H} \cdot \frac{\gamma_N(z)}{\gamma_H(z)} = K \cdot \frac{\gamma_N(z)}{\gamma_H(z)}, \quad (6)$$

式中, $S_{2N}(z)/S_{1N}(z)$: 氮 Raman 通道与水汽 Raman 通道接收的 386.7nm 回波信号的比值, K : 氮 Raman 通道对水汽 Raman 通道仪器常数的比值。

假设在某一高度 z_0 两通道重叠系数均为 1, 即 $\gamma_N(z_0)/\gamma_H(z_0) = 1$, 则 $S_{2N}(z_0)/S_{1N}(z_0) = K$, 将 K 值代回 (6) 式, 可得到两通道重叠系数比值随高度的分布, 即可对过渡区内回波信号进行修正。

图 2 给出了 1999 年 5 月 19 日和 6 月 2 日两天夜晚 $\gamma_N(z)/\gamma_H(z)$ 的垂直廓线。从图中可以看出, 5 月 19 日, $\gamma_N(z)/\gamma_H(z)$ 在 3.2 km 高度以上基本为 1, 6 月 2 日的 $\gamma_N(z)/\gamma_H(z)$ 在 3.5 km 高度以上才基本为 1。另外这两个夜晚的 $\gamma_N(z)/\gamma_H(z)$ 的垂直廓

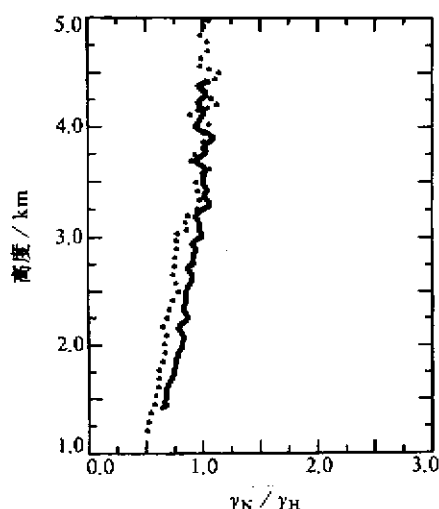


图2 1999年5月19日(实线)和6月2日(虚线) γ_N / γ_H 值随高度的分布

λ_x 波长的大气消光系数, 它由气溶胶和空气分子消光系数组成, 下表 x 代表水汽 Raman 参数 H 和氮气 Raman 参数 N.

这两个 Raman 波长的气溶胶消光系数是由中国科学院安徽光学精密机械研究所 L300 Mie 散射激光雷达测量的 532 nm 波长 1998 年年平均气溶胶消光系数按 λ^{-1} 的关系转化得到的。它们的分子 Rayleigh 散射消光系数是由 532 nm 波长美国标准大气中纬度消光模式按 λ^{-4} 的关系转化得到的。

图 3 给出了大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 随高度的分布。从图中可以看出大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 在地面与 6 km 之间只相差 6%。

图 4 给出了在几种 532 nm 波长的气溶胶光学厚度下, 大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 随高度的分布。从图中可以看出, 532 nm 波长气溶胶光学厚度 $\tau = 1.0$ (表示气溶胶的浓度非常高) 与 $\tau = 0$ (表示仅由空气分子产生的光学厚度) 的大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 在 6 km 处相差约 7%。因此在一般情况下, 大气透过率修正函数随高度的分布曲线介于这两者之间。

4.3 标定常数 C_w 的确定

标定常数 C_w 通过气象探空法来确定, 即在 Raman 激光雷达探测水汽混合比的過程中放一载有气象探空仪的探空气球, 在某一段距离内将气象探空仪测量的水汽混合比与 Raman 激光雷达测得的 Raman 后向散射信号比 $S_H(z) / S_N(z)$ 和大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 的乘积进行归一化处理, 即可确定标定常数 C_w 。标定一般在相对湿度没有较大突变且大于 30% 的高度范围内进行。

从 C_w 的公式可以看出, C_w 与氮 Raman 通道对水汽 Raman 通道仪器常数的比值 K ($K = K_N / K_H$) 成正比。而在 4.1 节公式 (6) 中的 K 值正是这两个通道仪器常数的比值。因此如果每个测量夜晚均进行两通道的波长 386.7 nm 回波信号的测量, 则除了可以获得两通道重叠系数比值随高度的分布外, 还可得到每个测量夜晚由于通道灵敏度

线在高度 3 km 以下彼此之间也有一定的差别, 这主要是由于这两个晚上发射激光光束与接收光学系统的平行度的细微差异引起的。这也说明了每个夜晚测量的 $\gamma_N(z) / \gamma_H(z)$ 都有可能由于发射和接收光学系统平行度的细微差异而有所不同, 因此在 Raman 激光雷达水汽混合比的测量之前一般都要进行 $\gamma_N(z) / \gamma_H(z)$ 的测量。

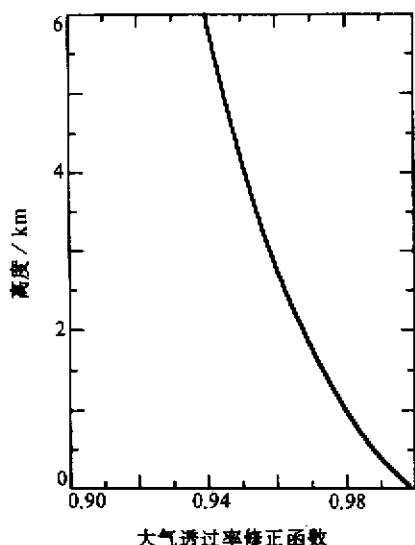
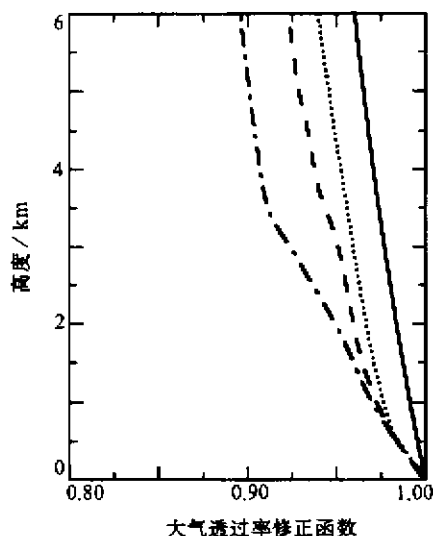
4.2 大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 的确定

大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 表示为

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

式中, $q(\lambda_x, z_0, z)$: λ_x 波长的大气透过率,

$$q(\lambda_x, z_0, z) = \exp\left(-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_x}(z') dz'\right), \quad \alpha_{\lambda_x}(z) :$$

图 3 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 随高度的分布廓线图 4 不同气溶胶光学厚度下 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 随高度的分布
——: $\tau=0.0$,: $\tau=0.25$,
---: $\tau=0.5$, —·—: $\tau=1.0$

的细微变化而引起的不尽相同的 K , 通过这些不同的 K 值将一次气象探空仪标定产生的标定常数 C_w 传递到每个测量夜晚, 求得当晚 Raman 激光雷达的系统标定常数。

5 结果分析

5.1 水汽混合比的垂直廓线

图 5、图 6 和图 7 分别给出了 1999 年 5 月 6 日、11 日和 14 日三个夜晚 L625 Raman 激光雷达探测的水汽混合比垂直廓线 (实线), 其探测水汽混合比的不确定度以短横线给出。为了比较, 图中一并给出了气象探空仪探测的水汽混合比垂直廓线 (点划线)。由于气象探空仪的测湿元件对相对湿度在 20% 以下的测量精度可能难以保证, 因此作为参考, 图中也给出了相对湿度为 20% 的水汽混合比廓线 (虚线)。

从这些图中可以看出, 这三天晚上的水汽混合比均有一突变层, 突变层的高度每晚不尽相同, 大致在 1.5~3.5 km 的高度范围内。突变层以下的水汽混合比较大, 突变层内水汽混合比急剧减小, 突变层以上的水汽混合比均小于 20% 相对湿度对应的水汽混合比。它反映了大气中水汽含量空间结构的复杂性。

其次, L625 Raman 激光雷达与气象探空仪测量的水汽混合比廓线除个别区域外在整个探测高度范围内具有较好的一致性。这表明 L625 Raman 激光雷达性能稳定; 测量的水汽 Raman 和氮气 Raman 后向散射回波信号的数据是可靠的, 有一定测量精度; 大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 和标定常数 C_w 等数据处理方法也是正确的。

从这些图中还可以看出, 在水汽含量较低的区域或在水汽突变层内, L625 Raman

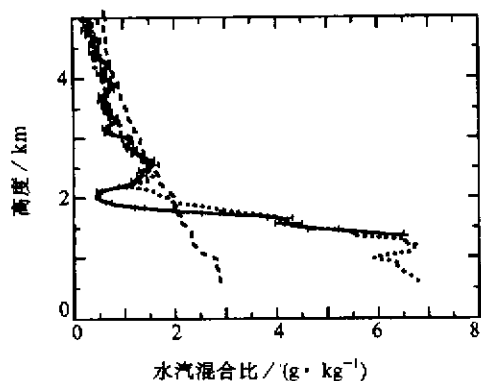


图 5 1999 年 5 月 6 日晚水汽混合比的垂直廓线

——: 激光雷达,: 气象探空仪,
---: 20% 相对湿度

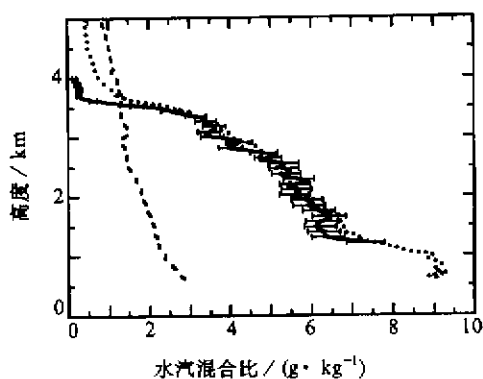


图 6 1999 年 5 月 11 日晚水汽混合比的垂直廓线

——: 激光雷达,: 气象探空仪,
---: 20% 相对湿度

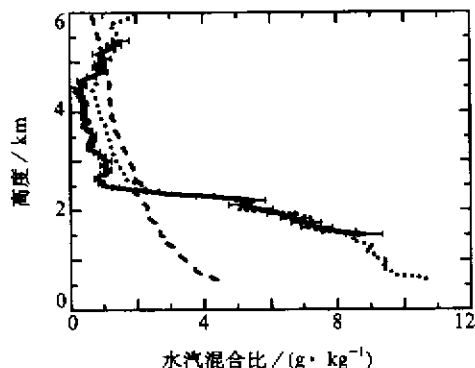


图 7 1999 年 5 月 14 日晚水汽混合比的垂直廓线

——: 激光雷达,: 气象探空仪,
---: 20% 相对湿度

激光雷达与气象探空仪测量的水汽混合比一致性较差。这可能有三个原因: 一是气象探空仪的测湿元件肠衣对湿度的响应速度比较慢, 在从高湿到低湿的突变过程中难以快速响应 (如图 5 中的 2 km 左右区域); 二是气象探空仪对于相对湿度较低情况下的测量误差较大, 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 (如图 7 中的 2.5 ~ 4.5 km 左右区域); 三是在高层低湿情况下, L625 Raman 激光雷达接收的水汽 Raman 后向散射回波信号变弱、信噪比降低, 探测误差大 (如图 6 中的 3.5 km

以上区域)。但是可以看出, 即使在上述区域内, L625 Raman 激光雷达和气象探空仪探测的水汽混合比变化趋势仍然是一致的。

5.2 个例分析

5.2.1 大气中水汽含量的时空变化

图 8 给出了 1999 年 5 月 26 日晚 20:20 至 21:20, 即 1 小时内 L625 Raman 激光雷达探测的 6 条水汽混合比的垂直廓线。从图中可以看出, 虽然 6 条曲线的形态变化不大, 但是水汽混合比的突变层从 20:20 的约 2.5 km 处下降到 21:20 的约 2.2 km 处, 1 小时内下降了 300 m 左右。另外, 低层的水汽混合比也逐渐变大, 这与地面相对湿度的观测结果较为一致, 地面相对湿度在 20:00 至 21:00 之间从 61% 逐渐增大到 80%。这说明大气中水汽含量的时空变化有时是较为显著的。

5.2.2 云层中的水汽混合比

图 9 给出了 1999 年 6 月 2 日晚 L625 Raman 激光雷达探测水汽混合比的垂直廓

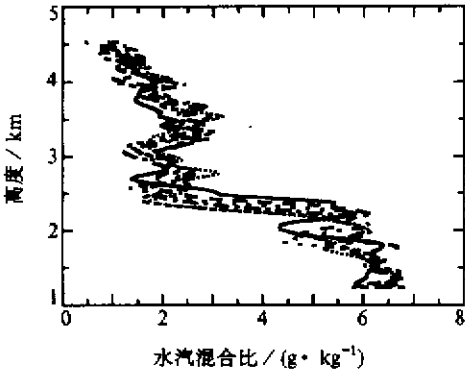


图 8 1999 年 5 月 26 日晚水汽混合比垂直分布的变化

——: 20:24~20:33, - - - - : 20:33~20:41,
- · - · : 20:41~20:50, — · — · : 20:50~21:00,
- - - - : 21:00~21:09, ······: 21:09~21:18

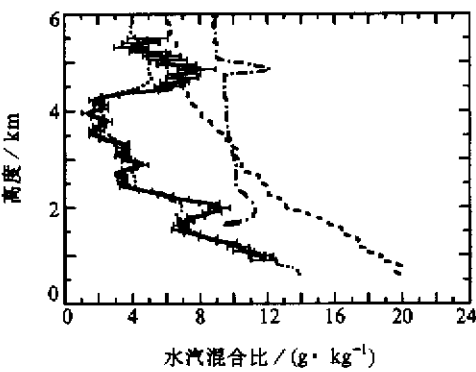


图 9 1999 年 6 月 2 日晚水汽混合比垂直廓线

——: 激光雷达, ·····: 气象探空仪,
- - - : 100% 相对湿度, — · — · : 355 nm

线、气象探空仪测量的水汽混合比廓线，以及 100% 相对湿度的水汽混合比廓线，图中同时还给出了 355 nm 波长大气后向散射回波信号的垂直廓线，它是由回波信号与距离平方乘积后再取对数得到的。

从图 9 中可以看出，355 nm 波长大气后向散射回波信号在 4.5~5 km 高度范围内变得很大，这是云层强烈的后向散射所致。与此对应的是 L625 Raman 激光雷达探测的水汽混合比在这高度范围内也明显偏大，达到了 8 g/kg，已同 100% 相对湿度的水汽混合比垂直廓线重合。而气象探空仪测量的水汽混合比的变化趋势与激光雷达结果较为一致，仅仅在 4.5~5 km 高度范围内测量的结果略微偏小。

6 误差分析

6.1 Raman 激光雷达探测水汽混合比的误差因子

在 Raman 激光雷达探测水汽混合比的公式 (4) 中，设 $T(z_0, z) = \Delta_q^w(z_0, z)$, $S(z) = S_H(z) / S_N(z)$ ，显然 $T(z_0, z)$ 和 $S(z)$ 之间的误差是不相关的，而 C_w 与 $T(z_0, z)$ 和 $S(z)$ 之间的误差在标定的高度范围内是相关的，但由于标定高度范围一般在低层， $T(z_0, z)$ 和 $S(z)$ 的误差很小（约为 1%），加之 C_w 的误差主要是气象探空仪的测量精度引起的，因此它们之间的相关性很弱，协方差项很小，为了突出主要的误差源，可以忽略协方差项。这样，根据误差传递公式可得水汽混合比的相对不确定度：

$$\left(\frac{\delta w}{w}\right)^2 = \left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta C_w}{C_w}\right)^2. \tag{8}$$

由 (8) 式可知 Raman 激光雷达探测水汽混合比的相对不确定度主要是由回波信号、大气透过率修正函数和标定常数三项的相对不确定度共同贡献的结果。

6.1.1 回波信号的相对不确定度 $\delta S / S$

Raman 激光雷达接收的回波信号的相对不确定度可表示为

$$\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 = \left(\frac{\delta N_{SH}}{N_{SH}}\right)^2 + \left(\frac{\delta N_{SN}}{N_{SN}}\right)^2, \quad (9)$$

式中, N_{SH} 、 N_{SN} : 水汽 Raman 和氮气 Raman 回波信号的计数值, δN_{SH} 、 δN_{SN} : 水汽 Raman 和氮气 Raman 回波信号的不确定度, 如果 δN_{SH} 和 δN_{SN} 仅代表回波信号的随机不确定度, 忽略放大器和光子计数器引起的信号不确定度, 那么水汽 Raman 和氮气 Raman 回波信号的相对不确定度可表示如下:

$$\frac{\delta N_{SH}}{N_{SH}} = \frac{\sqrt{N_{SH} + N_D + N_B}}{N_{SH}}, \quad (10)$$

$$\frac{\delta N_{SN}}{N_{SN}} = \frac{\sqrt{N_{SN} + N_D + N_B}}{N_{SN}}, \quad (11)$$

式中, N_D : 光电倍增管的暗计数, N_B : 背景辐射产生的计数, N_{SH} 、 N_{SN} 、 N_D 和 N_B 均是在发射大量激光脉冲数情况下的累加值。

6.1.2 大气透过率修正函数的相对不确定度 $\delta T / T$

根据大气透过率修正函数的表达式, 其相对不确定度可表示为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 = & \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_H} - \frac{\lambda_{532}}{\lambda_N}\right)^2 [\delta \tau_A(\lambda_{532}, z_0, z)]^2 + \left[\left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_H}\right)^4 - \left(\frac{\lambda_{532}}{\lambda_N}\right)^4\right]^2 \\ & \times [\delta \tau_M(\lambda_{532}, z_0, z)]^2. \end{aligned} \quad (12)$$

气溶胶和分子散射光学厚度的不确定度一般可假定为

$$\delta \tau_A(\lambda_{532}, z_0, z) = 0.5 \tau_A(\lambda_{532}, z_0, z), \quad (13)$$

$$\delta \tau_M(\lambda_{532}, z_0, z) = 0.1 \tau_M(\lambda_{532}, z_0, z), \quad (14)$$

式中, λ_{532} : 532 nm 波长。

6.1.3 标定常数 C_w 的相对不确定度 $\delta C_w / C_w$

由于标定常数 C_w 的误差主要是由于气象探空仪的精度有限造成的, 而国产五九型转筒式探空仪测量相对湿度的平均偏差可达 $\pm 5\%$, 加之测温和测压的误差, 因此我们将标定常数 C_w 的相对不确定度 $\delta C_w / C_w$ 估计为 6% 。

6.2 L625 Raman 激光雷达探测水汽混合比的误差分析

在大气中, 氮气的含量较水汽大得多, 相应的氮气 Raman 回波信号的信噪比也较水汽 Raman 回波信号的信噪比大得多, 这样水汽 Raman 回波信号的相对不确定度对水汽混合比相对不确定度的贡献较氮气大得多。对 L625 Raman 激光雷达探测信噪比的分析表明, 其水汽 Raman 回波信号的信噪比在 5 km 以下一般大于 4, 在 3 km 以下一般大于 15, 因此探测的水汽混合比由回波信号引起的相对不确定度在 5 km 以下小于 25%, 在 3 km 以下小于 7%。

利用模式大气计算获得的大气透过率修正函数的相对不确定度 $\delta T / T$ 由图 10 给出, 从图中可以看出大气透过率修正函数的相对不确定度到 6 km 高度处仅 2%。所以, 它对 Raman 激光雷达探测水汽混合比相对不确定度的贡献不大。标定常数的相对

不确定度 $\delta C_w / C_w$ 与高度无关, 为 6%。

由以上分析可知, L625 Raman 激光雷达探测水汽混合比的相对不确定度在 5 km 以下小于 30%, 在 3 km 以下小于 10%。

图 11 给出了 1999 年 6 月 2 日夜晚 L625 Raman 激光雷达探测水汽过程中信号的随机相对不确定度。从图中可以看出, 回波信号的随机相对不确定度随 L625 Raman 激光雷达探测水汽高度的增加而增大。在 2.25 km 高度以上, 回波信号的随机相对不确定度已超过 5%; 在 3.25 km 高度以上, 超过 10%, 在 5.25 km 处达到了 25% 左右。

图 12 是同晚 L625 Raman 激光雷达探测水汽混合比的相对不确定度。可以看出, 水汽混合比的相对不确定度随 L625 Raman 激光雷达探测水汽高度的增加而增大, 3 km 以下小于 10%, 5.5 km 以下小于 27%。

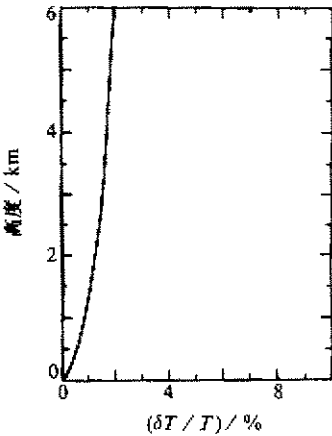


图 10 大气透过率修正函数的相对不确定度

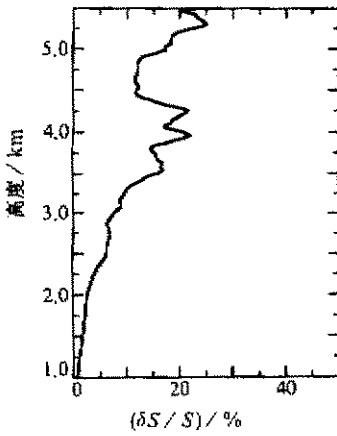


图 11 6 月 2 日 L625 Raman 回波信号的随机相对不确定度

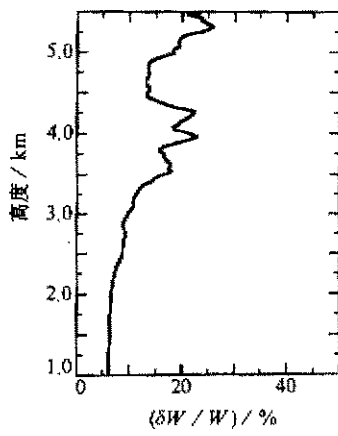


图 12 6 月 2 日 L625 Raman 激光雷达探测的水汽混合比的相对不确定度

7 总结

(1) L625 Raman 激光雷达探测的水汽混合比廓线与气象探空仪测量的水汽混合比廓线在整个探测高度范围内 (约 1~5 km) 具有较好的一致性。这表明 L625 Raman 激光雷达性能稳定; 测量的水汽 Raman 和氮气 Raman 后向散射回波信号的数据是可靠的, 有一定精度; 大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 和标定常数 C_w 等数据处理方法也是正确的。

(2) 夜间水汽混合比短暂的探测结果表明大气中水汽的时空变化有时是较为显著的。

(3) 对 L625 Raman 激光雷达探测水汽混合比的误差进行了定量的分析与研究。结果表明在 3 km 以下探测水汽混合比的相对不确定度小于 10%, 在 3~5 km 小于 30%。

致谢: 参加本项工作的还有马成胜高级工程师、陈爱珍工程师、吴永华博士、胡顺星硕士和张民硕士, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Shine, K. P. and A. Sinha, Sensitivity of the Earth's climate to height-dependent changes in the water vapour mixing ratio, *Nature*, 1991, **354**, 382~384.
- 2 Melfi, S. H., J. D. Lawrence and M. P. McCormick, Observation of Raman scattering by water vapor in the atmosphere, *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**, 295~297.
- 3 Cooney, J. A., Remote measurements of atmospheric water vapor profiles using the Raman component of laser backscatter, *J. Appl. Meteor.*, 1970, **9**, 182~184.
- 4 Melfi, S. H., D. N. Whiteman and R. A. Ferrare, Observations of atmospheric fronts using Raman lidar moisture measurements, *J. Appl. Meteor.*, 1989, **28**, 789~806.
- 5 Ansmann, A., M. Riebesell, U. Wandinger, C. Weitkamp, E. Voss, W. Lahmann and W. Michaelis, Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio, *Appl. Phys.*, 1992, **B 55**, 18~28.
- 6 Whiteman, D. N., S. H. Melfi and R. A. Ferrare, Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere, *Appl. Opt.*, 1992, **31**, 3068~3082.
- 7 Goldsmith, J. E. M., S. E. Bisson, R. A. Ferrare, K. D. Evans, D. N. Whiteman and S. H. Melfi, Raman lidar profiling of atmospheric water vapor: simultaneous measurements with two collocated systems, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1994, **75**, 975~982.
- 8 Ferrare, R. A., S. H. Melfi, D. N. Whiteman, K. D. Evans, F. J. Schmidlin and D. O'C. Starr, Comparison of water vapor measurements made by Raman lidar and radiosondes, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995, **12**, 1176~1195.
- 9 Grant, W. B., Differential absorption and Raman lidar for water vapor profile measurements: a review, *Opt. Eng.*, 1991, **30**, 40~48.

Raman Lidar System for the Measurements of Water Vapor Mixing Ratio in the Atmosphere

Li Tao, Qi Fudi, Jin Chuanjia, Yue Guming, Hu Huanling and Zhou Jun

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

Abstract The system structure and specifications of L625 Raman lidar are introduced. The fundamental principle and the data processing method of Raman lidar monitoring of water vapor are presented. By using the L625 Raman lidar, water vapor mixing ratio is measured over the city of Hefei. The characteristics of typical water vapor mixing ratio profiles are shown and analyzed. In the end, errors of the retrieved water vapor mixing ratio from the L625 Raman lidar measurements are also presented and discussed.

Key words: Raman lidar; water vapor mixing ratio; vertical profile; measurement