

Raman 激光雷达探测对流层中上部 大气温度分布*

吴永华 李 陶 周 军 胡欢陵
岳古明 戚福弟 金传佳

(中国科学院安徽光学精密机械研究所国家八六三计划大气光学重点实验室, 合肥 230031)

摘 要 介绍了一台氮分子 (N_2) Raman 激光雷达系统。利用 N_2 分子 Raman 散射和气溶胶及分子的 Mie-Rayleigh 散射信号, 通过同时订正分子、气溶胶和臭氧的衰减, 反演出对流层中上部大气密度和温度的垂直分布, 其结果与常规球载无线电探空仪探测资料对比, 在 8~18 km 范围内表现了较好的一致性。其中, 二者测量的温度在 9~15 km 高度内相对差别小于 4 K。

关键词: 激光雷达; Raman 散射; 大气温度; 对流层

1 引言

大气温度是大气物理、天气分析与预报及环境监测中的一个重要气象参数。模式研究和长期实验观测均表明全球对流层至中层大气的温度分布在变化^[1]; 米季德等^[2]分析北京高空温度资料发现, 近 30 年来对流层下层增温显著而对流层上层及平流层温度在降低。因此对大气温度分布的有效监测已显得十分重要。目前, 普通气象台站一般每天早晚施放两次无线电探空仪探测温度分布, 其时空分辨率易受风速和风向的影响, 尤其是其探测最大高度易受到限制。而激光雷达作为一种主动遥感工具, 具有较高的时空分辨率, 并已被用于气象和环境监测等领域^[3]。瑞利 (Rayleigh) 散射激光雷达通常可以探测 30 km 以上高度的大气温度, 该方法忽略了气溶胶粒子的影响^[4]。纯转动 Raman 激光雷达利用 N_2 或 O_2 分子的转动谱线强度与温度的关系可以测量低层大气的温度分布, 它要求光谱分辨率要高^[5]。由于 N_2 分子浓度较高且其质量混合比在大气中可视为常数, 故激光雷达可利用其振动 Raman 散射回波探测对流层中上部大气温度分布, 它对光谱分辨率的要求不高, 故可以弥补瑞利激光雷达和转动 Raman 激光雷达探测高度上的不足^[6]。国外相关工作的最大探测高度达 25~30 km^[7,8]。但是, N_2 分子 Raman 散射较气溶胶和分子的 Mie-Rayleigh 散射信号近似小 3~4 个量级, 故对其信号检测能力要求较高。

本文将介绍一台 N_2 分子振动 Raman 激光雷达系统, 它可以用于探测对流层中上部大气密度和温度分布, 然后简述了其探测原理和数据处理方法, 最后就其密度和温度

2000-09-25 收到, 2001-01-15 收到修改稿

* 国家 863 计划激光技术领域资助 (编号: 863-410-651)

观测结果分别与无线电气象探空仪的结果进行了对比分析和讨论。

2 N₂ 振动 Raman 激光雷达系统

L625 N₂ 振动 Raman 激光雷达主要包括激光发射、信号接收和数据采集及控制三部分。整个系统如图 1 所示。它是为进行水汽 (H₂O) Raman 激光雷达探测而设计的^[9], ND:YAG 固体激光器三倍频 355 nm 作为探测激光波长, 经导光单元垂直导向大气层, 单脉冲激光的能量约为 80 mJ, 重复频率为 10 Hz, 光束发散角小于 1 mrad; 其 N₂ 分子振动 Raman 频移波长为 386.7 nm。接收望远镜为直径 625 mm 的卡塞格林型 (Cassegrain), 接收视场角为 3 mrad。激光发射和信号接收属于非同轴系统, 系统的盲区约至 1.5 km。使用两个接收通道分别同时接收 N₂ 分子 Raman 散射回波和气溶胶及分子的 Mie-Rayleigh 散射信号。由于 N₂ 振动 Raman 回波较气溶胶和分子的散射信号近似小 3~4 个量级, 故 N₂ 分子 Raman 接收通道要求对 355 nm 处的回波具有较高的截止率。两路接收通道的探测器光电倍增管 (PMT) 前放置了窄带干涉滤光片。其中, N₂ 分子 Raman 通道中干涉滤光片中心波长为 386.7 nm, 峰值透过率为 60%, 它在 355 nm 和 375.7 nm(O₂ Raman 波长) 处的截止率为 10⁻¹², 以便有效地抑制 355 nm 处气溶胶和分子的 Mie-Rayleigh 散射信号; 同时, 它对背景光的抑制比为 10⁻⁶。该滤光片带宽为 4.3 nm, 它覆盖了 N₂ 分子 Raman 散射 Q、S 和 O 支光谱, 减小了

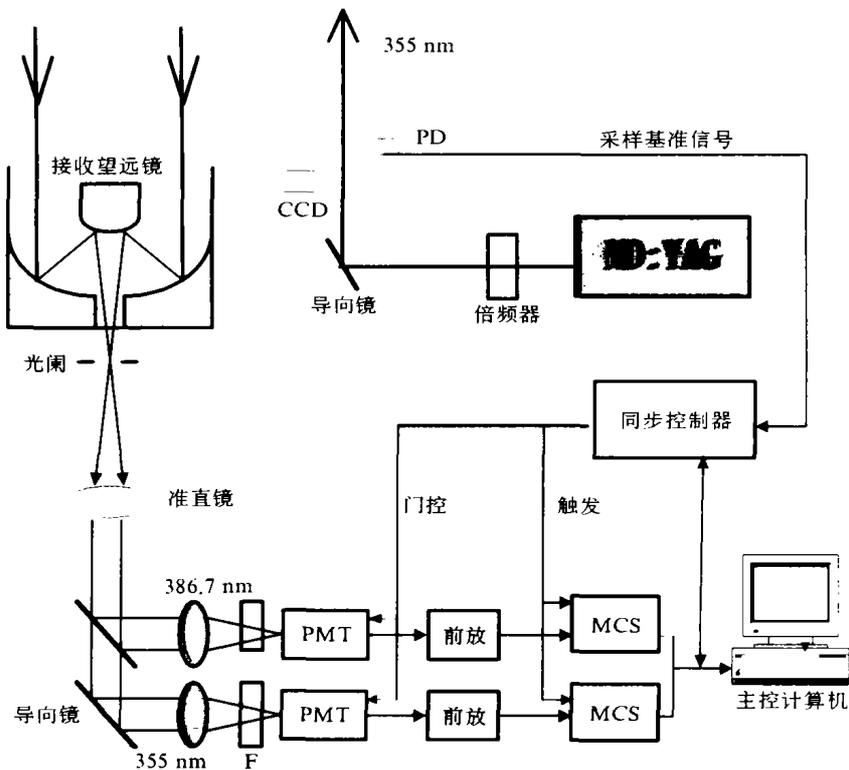


图 1 L625 N₂ Raman 激光雷达结构框图

N_2 分子 Raman 散射截面因对温度的敏感性而带来的影响。气溶胶及分子 Mie-Rayleigh 通道中的干涉滤光片中心波长为 355 nm, 峰值透过率为 40%, 带宽为 1 nm, 对背景光的抑制比为 10^{-6} 。选用了线性聚焦型 PMT(EMI 9817B) 作为探测器, 它带有电子门控电路, 用于选择接收回波信号的开门高度, 其抑制比为 1000:1。为抑制热噪声和暗电流噪声, PMT 配置了相应的致冷器, 致冷温度通常低于 -20°C 。由于 N_2 分子 Raman 回波信号较弱, PMT 的输出经放大后, 由 T914P 型多道光子计数器 (MCS) 检测信号, 其最大计数率为 150 MHz, 并具有累加、平均、甄别和存贮功能。基于 Windows 界面的计算机软件可分别设置信号采样的分层厚度、最大高度、甄别电平和激光发射脉冲数, 实时显示回波信号随高度的分布曲线。

3 探测原理及数据处理

利用 N_2 分子振动 Raman 散射的回波信号, 通过扣除大气透过率的影响, 可以得到 N_2 分子密度。通常认为大气中 N_2 分子的体积混合比为常数, 从而可以得到大气分子的密度, 然后结合大气静力学方程和理想气体状态方程可得到大气温度。记 λ_0 为发射激光波长, λ_N 为 N_2 振动 Raman 频移波长, 则 N_2 分子 Raman 回波可由激光雷达方程表示为

$$P(\lambda_N, z) = K\beta_N(z) \times Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z) \times Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z) \times Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z) / z^2, \quad (1)$$

其中:

$$Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z) = \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_m(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_N, z')] dz'\right\}, \quad (2)$$

$$Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z) = \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_p(\lambda_0, z') + \alpha_p(\lambda_N, z')] dz'\right\}, \quad (3)$$

$$Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z) = \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_o(\lambda_0, z') + \alpha_o(\lambda_N, z')] dz'\right\}, \quad (4)$$

$$\beta_N(z) = \sigma_N N_N(z), \quad (5)$$

$P(\lambda_N, z)$ 为 N_2 分子振动 Raman 散射的回波信号强度; K 为系统常数, 它与激光的初始能量、系统光学效率、望远镜有效接收面积和探测器量子效率等有关; $\beta_N(z)$ 为 N_2 分子振动 Raman 后向散射系数; $Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z)$, $Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z)$ 和 $Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z)$ 分别对应为分子、气溶胶和臭氧对 N_2 Raman 回波的大气透过率, $\alpha(z)$ 为消光系数, 下标 m 、 p 和 o 分别代表分子、气溶胶和臭氧。 σ_N 和 $N_N(z)$ 分别为 N_2 分子振动 Raman 散射截面和数密度。通常 N_2 分子体积混合比在空气中可视为常数, 若假定某一高度 z_0 处的大气分子数密度已知, 则通过校正大气透过率项, 可以得到其他高度上的大气分子数密度 $N(z)$:

$$N(z) = \frac{P(\lambda_N, z) \times z^2}{P(\lambda_N, z_0) \times z_0^2} N(z_0) Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0) Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0) Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0). \quad (6)$$

一般地, 瑞利散射激光雷达探测 30 km 以上大气温度时, 常常认为大气透过率项

近似为常数 1.0, 但在对流层中这种近似是不合理的^[7,8]。结合大气静力学和理想气体状态方程, 可以推出大气温度 $T(z)$ 的表达式^[4]:

$$T(z) = \frac{T(z_c)N(z_c) + \frac{M}{R} \int_z^{z_c} g(z')N(z')dz'}{N(z)}, \quad (7)$$

式(7)中 z_c 为参考温度的高度, $T(z)$ 与 $T(z_c)$ 分别为 z 和 z_c 高度上的大气温度; M 为空气分子的摩尔质量; R 为气体普适常数; $g(z)$ 为重力加速度。从式(7)看出, 温度与大气绝对密度无关, 而只与大气的相对密度和参考温度有关。参考温度的高度选取越高对低层温度廓线的影响越小, 这是由于大气密度随高度增大而呈指数下降, 故参考温度的高度越高, 参考温度的不确定性带来的影响就越小, 但是它往往又会受信噪比的限制。

L625 N_2 分子 Raman 激光雷达在合肥市西郊晴朗的夜晚进行观测, 测量累积时间一般为 1~1.5 h, 采集数据的空间分辨率为 30 m; 采样点数为 1 000, 对应的采样最大高度为 30 km。数据处理过程为首先计算背景值并扣除; 然后对原始回波信号进行滑动平滑处理, 10 km 以下平滑窗宽度为 300 m, 10 km 以上平滑窗宽度为 600 m, 这样有利于降低回波信号的随机起伏带来的不确定性。分子的消光系数由当晚的探空或模式资料依据 Rayleigh 散射理论算出。气溶胶消光系数由 355 nm 处的 Mie 散射回波使用 Fernald 方法得到^[10], 其消光后向散射比取 30^[7]。Evans 等^[7]分析表明消光后向散射比变化 ± 5 时, 对计算温度的影响小于 1 K。由气溶胶消光系数与波长依赖关系可以得到 N_2 分子 Raman 波长 386.7 nm 处的气溶胶消光系数, 波长指数取-1^[11]。臭氧吸收系数由美国 1976 标准大气臭氧模式计算得到。密度归一化高度选在 15 km 附近; 参考温度高度选在 17 km 附近, 该处信噪比通常大于 8。为验证该激光雷达性能和数据处理方法的可靠性, 其观测结果与五九型无线电探空仪结果进行了对比分析。无线电探空仪在距激光雷达站点约 100 m 处施放, 与激光雷达的探测时间差小于 2 h。

4 观测结果及讨论

图 2 给出了 1999 年 5 月 26 日晚该激光雷达获得的 N_2 分子 Raman 回波信号, 可以看出有效信号至 20 km, 该高度处的信噪比约为 4.5, 26 km 以上高度基本上为背景噪声。密度归一化高度 z_0 ($z_0 = 15$ km) 处的信噪比大于 10。图 3 为计算的 $Q_m(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0)$, $Q_p(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0)$ 和 $Q_o(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0)$ 项, $Q(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0)$ 为三者的乘积。它们在 z_0 以下对应为大气透过率, z_0 以上对应为大气透过率的倒数; 可以看出总的大气透过率 $Q(\lambda_N, \lambda_0, z, z_0)$ 明显随高度而变化, 且其数值大小并不接近 1.0。其中, 大气分子的透过率最小; 气溶胶的透过率在 12 km 以上随高度变化较小且接近 1.0; 而臭氧的透过率始终接近 1.0, 可见其影响最小。图 4 给出了该激光雷达得到的大气密度, 它与无线电探空仪的结果基本上表现了较好的一致性。在 9~18 km 范围内二者的相对偏差小于 3%; 9 km 以下和 18 km 以上激光雷达的结果偏小。图 5 为计算得到的大气温度分布, Raman 激光雷达与无线电探空仪测量的温度在 7~21 km 范围内

表现了较为一致的分布趋势，在 9 km 和 19 km 左右的两个结构区也较为相似，其中在 9~15 km 范围内符合得较好。无线电探空仪的温度经线性内插到与激光雷达同样的高度，则计算二者温度的相对偏差小于 4 K。但是，激光雷达测量的温度在 9 km 以下明显偏大，在 18 km 以上因激光雷达的回波信噪比较小而具有一定的波动。二者测量的对流层顶高度也存在差异，这可能是球载无线电探空仪受风向和风速的影响，与激光雷达测量的大气层存在着一定的差异。另外，激光雷达给出的温度分布是垂直方向上 1 至 1 个半小时的平均分布，而无线电探空仪测量的是气球飞行路径高度上短时间内的温度分布，即二者测量的大气层和时间不同很可能会导致观测结果的差异。还应指出，局地对流层中大气重力波的活动也会带来密度和温度分布上的波动^[12]。

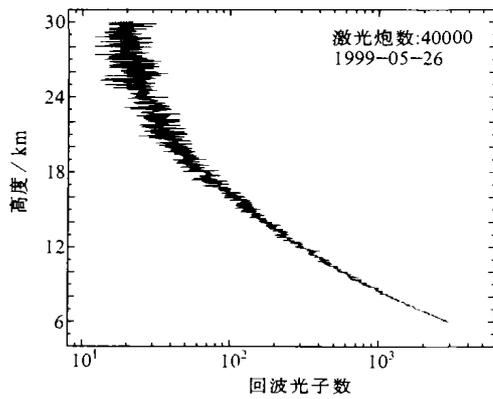


图 2 激光雷达 N₂ Raman 通道回波信号

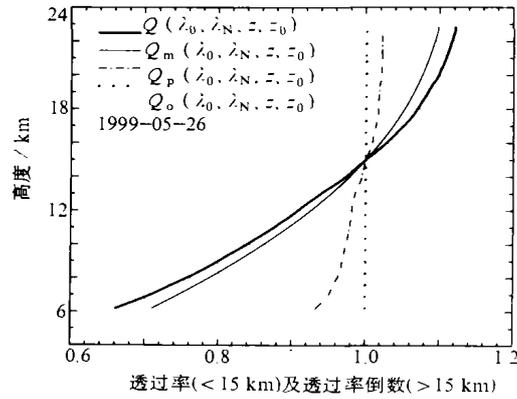


图 3 分子、气溶胶和臭氧的透过率 ($z < 15$ km)

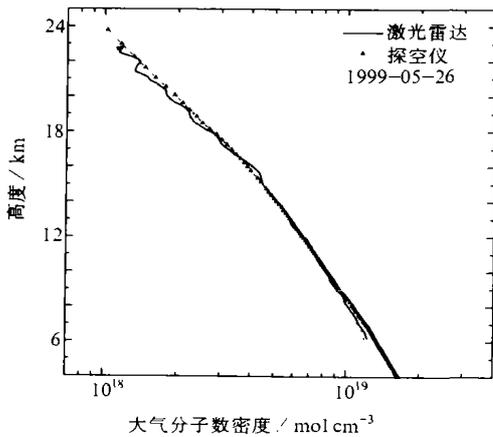


图 4 激光雷达和探空仪得到的大气分子密度

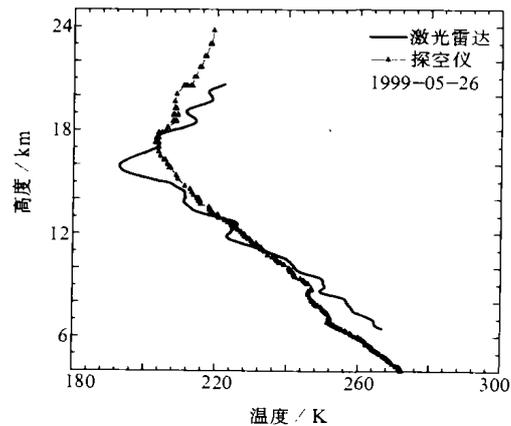


图 5 激光雷达和探空仪得到的大气温度

我们计算了参考温度和气溶胶消光波长指数的不确定性带来的影响。以 1999 年 5 月 26 日的数据为例，当参考温度 T_0 (17 km 处) 增大 3.0 K 时，反演的温度也会增大；其中温度变化量在高度 12 km 以下小于 1.5 K，在 14.5 km 以下小于 2 K；在 17~

20 km 之间温度变化小于 5.2 K。而当参考密度增大 10% 时, 计算的温度结果不受影响。当气溶胶消光波长指数从 -0.5 变化到 -2.0 时, 计算出的温度相对变化在高度 8.2 km 以下小于 0.47 K, 8.2~20 km 范围内小于 0.2 K。可见, 目前在合肥地区对流层中上部比较清洁情况下, 气溶胶消光波长指数的不确定性带来的影响较小。

图 6 为 1999 年 6 月 18 日晚该 Raman 激光雷达得到的大气密度, 激光发射 45 000 炮。可以看出, 在 8~18 km 范围内激光雷达获得的大气密度与探空仪的结果分布趋势基本一致, 但激光雷达的结果偏小。利用该组密度计算的温度分布如图 7 所示。在 10~14 km 范围内二者的温度符合得很好。探空仪的数据经线性内插到与激光雷达同样的高度, 二者温度的相对差别小于 4 K。9 km 左右的逆温层结构也基本相似, 但 10 km 以下激光雷达的结果明显偏大。这很可能与局地对流层大气的不同有关, 尤其是对流层中低层气溶胶分布的剧烈变化会给大气透过率的校正带来困难, 国外同类激光雷达的温度观测有时在对流层中低层也较探空仪结果明显偏大^[7,8,13]。由于当天晚上气象探空仪飞行的最大高度为 14.2 km, 故图 7 也给出了 1999 年 6 月 13 日的探空数据供参考, 其最大高度为 22 km。可以看出, 探空仪的结果表明对流层中低层的温度分布在天与天之间变化亦较大。总之, 该 Raman 激光雷达与探空仪给出的温度分布趋势是比较一致的, 这表明其结果是基本合理的。

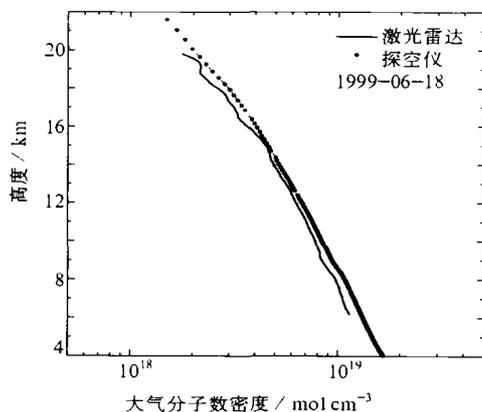


图 6 激光雷达和探空仪得到的大气分子密度

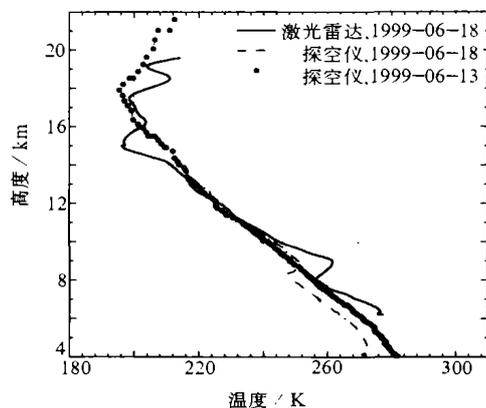


图 7 激光雷达和探空仪得到的大气温度

5 小结

在目前对流层背景大气条件下, 该 Raman 激光雷达能够用于探测对流层中上部大气密度和温度的分布。并同时通过利用其 Mie-Rayleigh 散射信号来订正气溶胶的影响。在 8~18 km 范围内, 该激光雷达获得的大气密度和温度与无线电探空仪的结果比较一致。其中, 在 9~15 km 范围内温度结果符合得较好, 但 9 km 以下激光雷达获得的温度偏高。受回波信噪比的限制, 15 km 以上激光雷达测量得到的温度分布波动较大。Raman 激光雷达应用于气象领域具有独特的优点, 但是可能由于 Raman 散射信号比较弱, 研制该类激光雷达的成本高且技术难度大, 因而国内这方面工作公开报道得很少, 本文旨在

尝试该方法的可行性, 其结果基本合理。我们希望下一步提高发射激光的能量来提高信噪比; 另外, 同时使用 N_2 分子 Raman 和气溶胶 Mie 散射回波可以得到较为准确的气溶胶或云的消光系数, 这对于校正低层气溶胶和云层的强衰减可能会更有利。

致谢: 马成胜高级工程师和陈爱珍工程师配合施放了无线电探空仪, 胡顺星和张民等同志参加了该激光雷达的实验观测, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Golityn, G. S., A. I. Scmenov, L. M. Fishkova, Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**, 1741~1744.
- 2 米季德、崔继良、曹鸿兴, 北京高空温度的统计特征, *气象学报*, 1999, **57**(2), 236~241.
- 3 Hinkley, E. D., *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Springer-Verlag, Berlin, 1976, 153~232.
- 4 Shibata, T., M. Kobuchi and M. Maeda, Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with XeF lidar, *Appl. Opt.*, 1986, **25**(6), 685~688.
- 5 Arshinov, Y. F., S. M. Bobrovnikov, V. E. Zuev and V. M. Mitev, Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar, *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19), 2984~2990.
- 6 Cooney, J. A., Use of Raman scattering for remote sensing of atmospheric properties of meteorological significance, *Opt. Eng.*, 1983, **22**(3), 292~301.
- 7 Evans, K. D., S. H. Melfi, R. A. Ferrare and D. N. Whiteman, Upper tropospheric temperature measurement with the use of a Raman Lidar, *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12), 2594~2607.
- 8 Philippe, K., M. L. Chanin and A. Hauchecorne, Stratosphere temperature measurement using Raman Lidar, *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34), 5182~5186.
- 9 李陶, 水汽Raman激光雷达探测, 中国科学院安徽光学精密机械研究所硕士学位论文, 1999.
- 10 Fernald, F. G., Analysis of atmospheric lidar observation: some comments, *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5), 652~653.
- 11 周军、岳古明等, 探测对流层气溶胶的双波长米散射激光雷达, *光学学报*, 2000, **20**(10), 1412~1417.
- 12 Chanin, M. L., A. Hauchecorne, A. Garnier and D. Nedelkovic, Recent lidar developments to monitor stratosphere-troposphere exchange, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**, 1073~1081.
- 13 Shibata, T., T. Sakai, M. Hayashi, T. Ojio et al., Raman Lidar observations, simultaneous measurements of water vapor, temperature and aerosol vertical profiles, Part II, *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996, **48**, 1137~1144.

Raman Lidar Measured Temperature Profiles in the Mid- and Upper Troposphere

Wu Yonghua, Li Tao, Zhou Jun, Hu Huanling, Yue Guming,

Qi Fudi and Jin Chuanjia

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

Abstract N_2 molecule vibrational Raman lidar is described in this paper. We obtained air density and temperature distributions in the mid and upper troposphere by simultaneously correcting the attenuation of air molecule, aerosol and ozone. By comparison with the routine radiosonde observations, the distribution trends of air density and temperature obtained by this N_2 Raman lidar show a good agreement with ones of radiosonde over the altitudes of 8 km to 18 km. Their relative differences of temperature are smaller than 4 K from 9 km to 15 km altitude.

Key words: lidar; Raman scattering; air temperature; troposphere