

# 瑞利散射激光雷达探测平流层 和中间层低层大气温度<sup>\*</sup>

吴永华 胡欢陵 胡顺星 周 军 张 民

(中科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** 介绍了一台瑞利散射激光雷达, 它能够探测 22~60 km 范围内大气温度的垂直分布; 比较了两种反演温度的数据处理方法。该激光雷达分别与 UARS/HALOE 卫星和无线电探空仪观测结果进行了对比, 均表现了较好的一致性。同时还模拟分析了平流层低层气溶胶对计算温度的影响。

**关键词:** 瑞利散射; 激光雷达; 平流层; 中间层; 温度

## 1 引言

平流层和中间层温度的分布与大气臭氧及其光化学反应紧密相关, 同时它亦受到大气重力波和大气环流结构的影响。模式和实验观测的研究表明, 北半球中纬度地区平流层和中间层在致冷<sup>[1,2]</sup>。国际平流层变化观测网 (NDSC) 和平流层过程及其气候作用组织 (SPARC) 已加强了在全球范围内对平流层温度的有效监测和评估。目前, 探测中层大气温度的主要手段有火箭及高空气球探空、激光雷达和卫星等。激光雷达具有较高的时空分辨率, 且能够进行单点长期连续的观测, 为研究中层大气温度的变化及卫星数据的定标提供了较好的资料<sup>[3]</sup>。本文首先介绍了一台能够用于探测 22~60 km 范围内大气温度的瑞利激光雷达, 简述了其数据处理方法及过程, 然后给出了它与 UARS/HALOE 卫星及无线电探空仪观测的温度分布。

## 2 瑞利激光雷达与探测温度原理

### 2.1 L625 瑞利散射激光雷达

L625 瑞利散射激光雷达主要由激光发射、回波信号接收和数据采集及控制三部分组成。整个系统如图 1 所示。Nd:YAG 激光器调 Q 单横模二倍频输出 532 nm, 其单脉冲能量约为 70 mJ, 重复频率为 10 Hz, 光束发散角小于 1 mrad。在其垂直发射光路上设置 CCD 监视光束方向及其调整。接收望远镜为卡塞格林 (Cassegrain) 型, 直径为 62.5 cm, 接收视场角为 1~2 mrad; 后向散射光信号由 EMI 9817B 型光电倍增管 (PMT) 进行光电信号转化, 其输出经放大后由光子计数器检测并把结果传给计算机实

2000-08-08 收到, 2000-11-13 收到修改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目 49775258

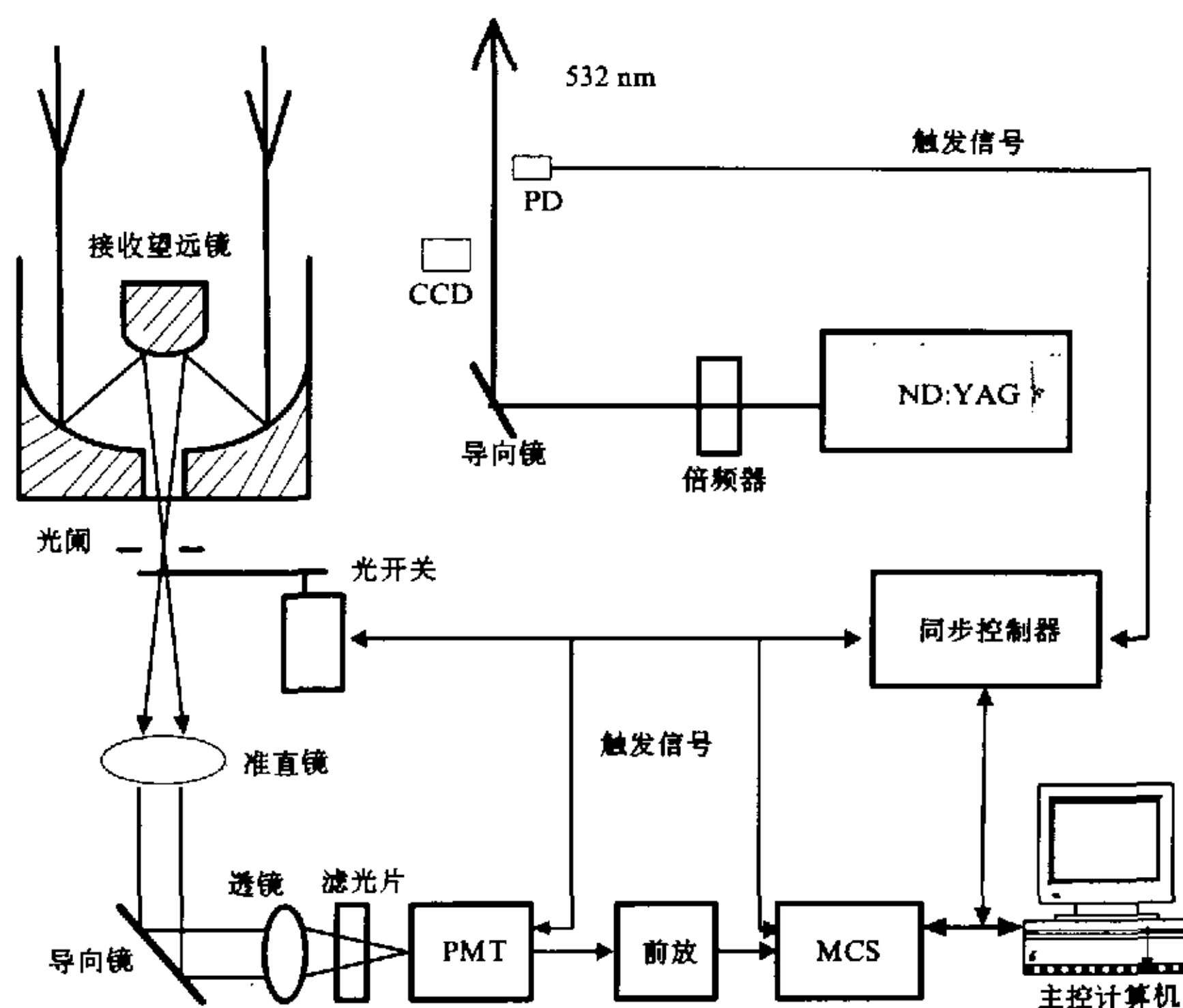


图1 L625 瑞利激光雷达结构框图

时显示和贮存。接收望远镜焦平面附近放置了机械斩光盘，且 PMT 带有电子门控电路，二者有效地抑制低层强回波给 PMT 带来的非线性效应及信号诱导噪声；PMT 配置了相应的制冷器，用以降低它的热噪声和暗电流噪声。采用多道光子计数器（MCS）来检测高层弱回波信号，其最大计数率为 150 MHz。同时为了抑制天空背景噪声，在 PMT 前放置了窄带干涉滤光片，其带宽为 0.87 nm，峰值透过率为 51%。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、高度、甄别电平和激光发射脉冲数，并实时显示回波信号随高度的分布曲线。整个系统可通过同时使用 Nd:YAG 的三倍频 355 nm 和 XeCl 准分子激光器输出而具备常规探测平流层臭氧的能力<sup>[4]</sup>。

## 2.2 探测大气温度原理

瑞利散射激光雷达适合于探测平流层中上部以上高度的大气温度分布<sup>[5,6]</sup>。其主要原理是：认为平流层中上部以上的大气回波主要是分子瑞利散射信号，忽略气溶胶粒子的散射信号；假设已知某一高度上大气密度，可求得大气密度廓线；结合理想气体状态方程和大气静力学方程求得大气温度。大气密度可由瑞利激光雷达的回波信号表示为

$$N(z) = \frac{S(z) z^2}{S(z_0) z_0^2} N(z_0) Q^2(z, z_0), \quad (1)$$

其中,  $N(z)$  和  $N(z_0)$  分别为  $z$  和  $z_0$  高度上的大气密度,  $z_0$  为参考密度高度, 一般选在 40 km 附近;  $S(z)$  和  $S(z_0)$  分别对应  $z$  与  $z_0$  高度上的大气回波光子数;  $Q^2(z, z_0)$  为  $z$  至  $z_0$  高度的大气双程透过率。结合理想气体状态方程和静力学方程可推知大气温度的表达式, 其中 Shibata 等<sup>[5]</sup>选择某一高度上的大气温度和密度作为参考值, 得到了温度的表达式:

$$T(z) = \frac{T(z_c)N(z_c) + \frac{M}{R} \int_z^{z_c} g(z')N(z')dz'}{N(z)}. \quad (2)$$

Hauchecorne 等<sup>[6]</sup>以大气压力作为参考值, 推出另一种表达式如方程 (3) 所示:

$$T(z_i) = \frac{Mg\Delta z}{R \left[ \ln p\left(z_i - \frac{\Delta z}{2}\right) - \ln p\left(z_i + \frac{\Delta z}{2}\right) \right]}, \quad (3)$$

其中:

$$p\left(z_i - \frac{\Delta z}{2}\right) = p\left(z_i + \frac{\Delta z}{2}\right) + N(z_i)g(z_i)\Delta z,$$

$$p\left(z_i + \frac{\Delta z}{2}\right) = p_c + \sum_{j=i+1}^n N(z_j)g(z_j)\Delta z.$$

式 (2) 和 (3) 中  $T(z)$  与  $T(z_c)$  分别为  $z$  和  $z_c$  高度上的大气温度,  $z_c$  为参考温度或参考压力的高度;  $M$  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;  $p(z_i - \Delta z/2)$  和  $p(z_i + \Delta z/2)$  分别对应高度  $z_i - \Delta z/2$  和  $z_i + \Delta z/2$  处的大气压力;  $p_c$  为参考高度处的大气压力。

L625 瑞利激光雷达采取高低层回波信号分时测量的方法, 其低层回波信号可以得到气溶胶的后向散射系数, 高层回波信号用于反演温度廓线, 这样有利于判断气溶胶对计算温度的影响程度。由于目前合肥地区平流层相对比较清洁<sup>[7]</sup>, 故从高度 22 km 开始计算温度。参考温度高度  $z_c$  一般选在回波信噪比大于等于 5 的高度; 参考密度、温度或压力取自于 CIRA 86 模式 30°N 的月平均值<sup>[8]</sup>。中分辨率大气辐射传输软件 (Modtran) 计算表明, 在 30~60 km 之间 532 nm 波长的大气双程透过率为 0.977 8。由于实际大气的双程透过率无法确切知道, 故在本文的计算中近似取大气双程透过率为 1, 这种近似会给大气密度的计算结果带来 2%~3% 的误差。由方程 (1)、(2) 和 (3) 知, 温度的精度主要与回波信号的强弱、大气双程透过率、大气的相对密度及参考值的不确定性等有关, 而与大气的绝对密度无关。

L625 激光雷达选在合肥西郊 (31.9°N, 117.17°E) 比较晴朗且无云的夜晚观测温度。观测持续时间为 1~3 h, 采样空间分辨率为 150 m, 采样最大高度为 150 km。由于平流层及中间层相对比较稳定, 我们选择了 UARS/HALOE 卫星在合肥临近地区及相邻天的温度观测作对比分析。UARS/HALOE 是载于 UARS 卫星上的一个红外辐射计, 它通过测量 2.8  $\mu\text{m}$  带附近  $\text{CO}_2$  的透过率来反演大气温度。35 km 以下的温度由 NOAA/NCEP 给出, 在 35~85 km 范围内 HALOE 测量的温度精度为 2~5 K, 在平流层顶附近其温度结果偏低 3~5 K<sup>[9]</sup>。



### 3 观测结果与讨论

2000 年 4 月 5 日晚上使用该激光雷达进行了温度观测。分别利用方程 (2) 和 (3) 两种方法计算得到了温度廓线, 参考高度选在 56 km 处。从图 2 看出, 这两种方法计算得到的温度分布趋势是一致的。其中, 在 22~44 km 范围内它们的大小一致性很好, 且均与 CIRA 86 模式温度符合得很好; 而 44 km 以上 Hauchecorne 方法的结果稍微偏大, 这很可能与参考值的选取不同有关。无论参考值选温度还是压力, 由于大气密度均随高度的下降而增大, 故随高度下降参考值的不确定性对激光雷达的温度结果影响逐渐减小。计算表明, 当参考温度偏低 5 K 时, 整个温度廓线均偏低, 其中 45 km 以下温度变化幅度小于 2 K; 当参考压力变化 5% 时, 45 km 以下温度变化幅度小于 2.5 K。因此, 无论是使用方程 (2) 还是方程 (3) 计算, 参考高度的选取越高越有利, 但是它会受到激光雷达回波信噪比的限制。

图 3 分别给出该激光雷达和 HALOE 卫星观测的温度分布。其中, 激光雷达在 2000 年 4 月 5 日北京时间 22:00~23:30 观测; HALOE 的观测在 2000 年 4 月 3 日北京时间 17:58, 观测地点为 (26.97°N, 123.3°E), 距合肥约 808 km。由图 3 中激光雷达 532 nm 的结果可以看出, 在 22~48 km 范围内平流层温度随高度升高而递增较快, 平流层顶位于 48 km 附近; 而在中间层底部温度随高度升高而迅速下降。平流层顶附近的温度大小与相邻地区武汉的观测值基本一致<sup>[10]</sup>。激光雷达与 HALOE 的结果在 22~60 km 高度范围内表现了较好的一致性。在 22~44 km 范围内激光雷达和 HALOE 的结果几乎是一致的; 而 44 km 以上尤其在平流层顶附近 HALOE 卫星的结果偏小, 二者的相对差别小于 8 K。20 km 附近激光雷达的结果偏小, 这很可能是由于忽略气溶胶的影响而导致的。图 3 同时也给出了该激光雷达利用 Nd:YAG 三倍频输出 355 nm 的回波得到的温度, 它与 532 nm 波长的结果基本一致, 这表明了该激光雷达的回波信号是可靠的; 在 30 km 以下二者温度的不同则说明存在气溶胶的影响, 但是这种影响并不大; 40 km 以上高度由于 355 nm 波长的回波信噪比不够而导致了其反演温度的不确定性较大。

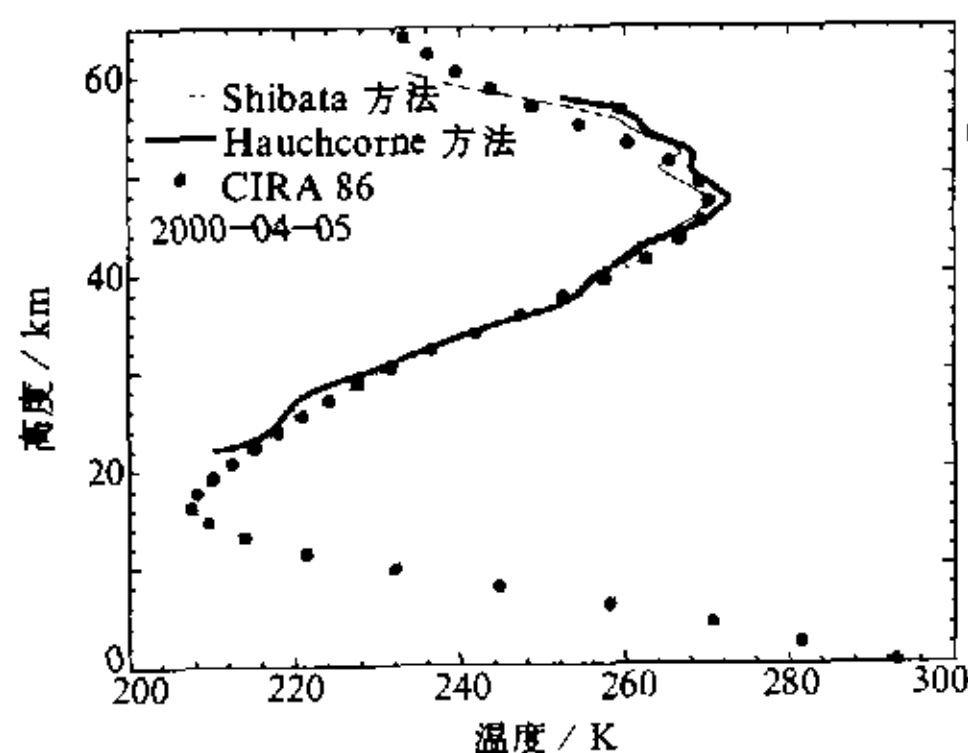


图 2 两种算法计算得到的温度分布

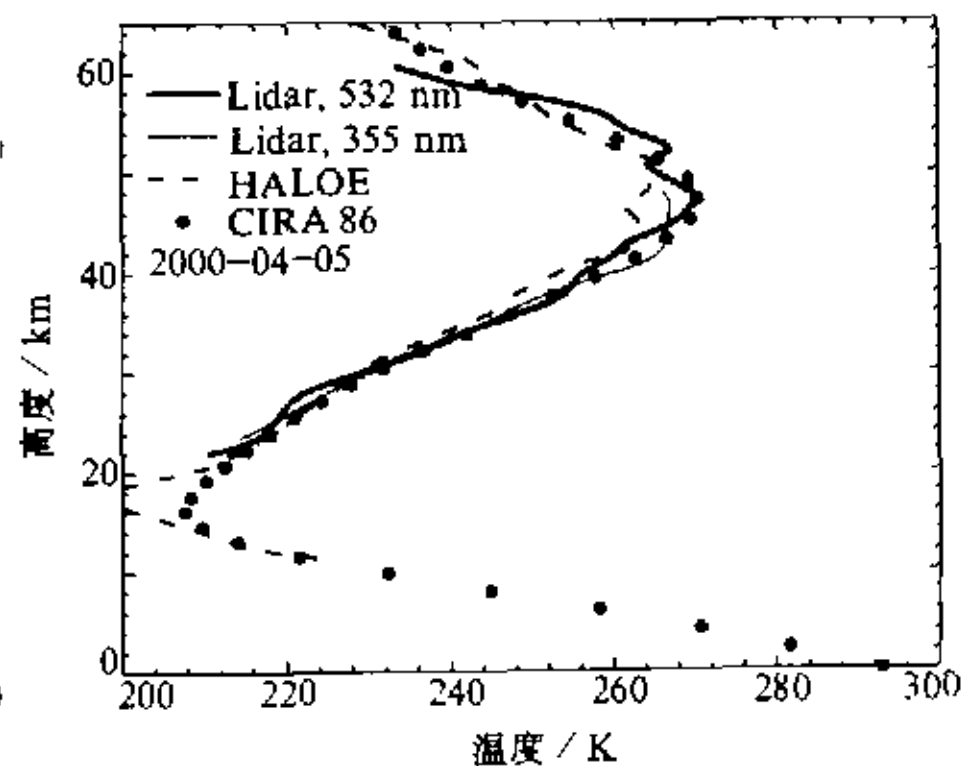


图 3 激光雷达和 HALOE 卫星得到的温度分布

图 4 为激光雷达与 HALOE 及无线电探空仪测量的温度廓线。其中, 激光雷达在北京时间 2000 年 4 月 17 日 3:00~4:30 观测; HALOE 观测在北京时间 2000 年 4 月 18 日 5:00, 观测地点为 ( $31.65^{\circ}\text{N}$ ,  $127.10^{\circ}\text{E}$ ), 距合肥约 949 km; 无线电探空仪于北京时间 2000 年 4 月 16 日 21:00 在该激光雷达站点施放, 持续观测时间约为 90 min。由图 4 看出, 在 30~57 km 范围内激光雷达与 HALOE 的结果反映了较为一致的温度分布特点, 二者的相对差别小于 6 K; 57 km 以上激光雷达因其信噪比下降而导致了计算温度的不确定性较大。激光雷达与无线电探空仪的结果在低层 22~28 km 范围内表现了相当好的一致性, 它们的相对差别小于 2 K。这表明该激光雷达观测的温度分布是可靠的。

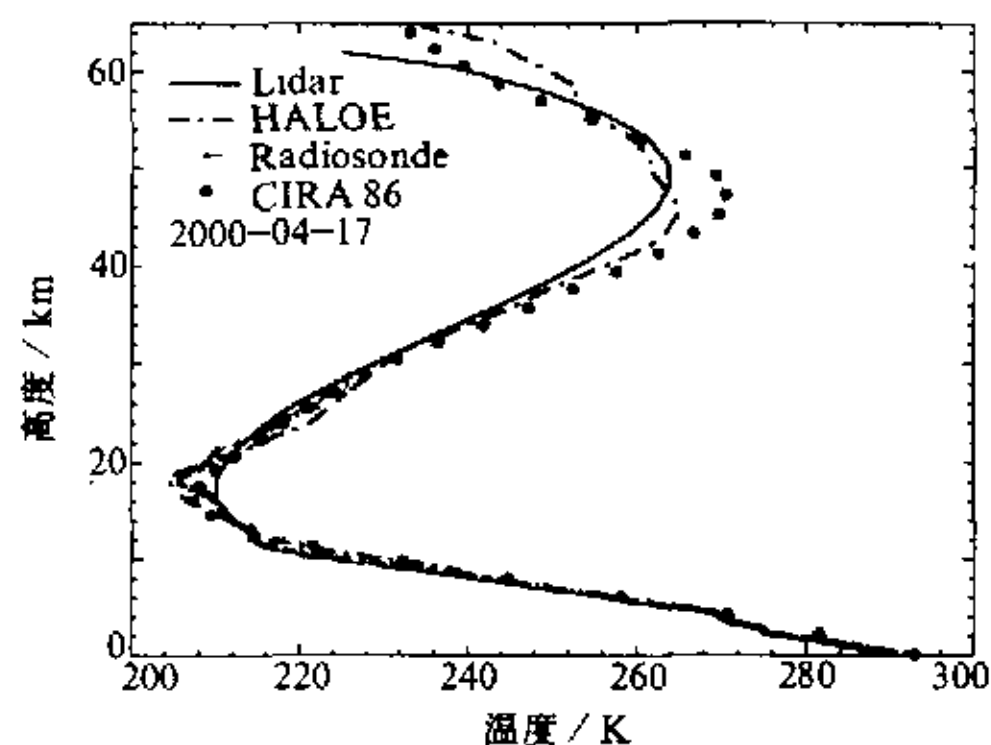


图 4 激光雷达、HALOE 和探空仪得到的温度

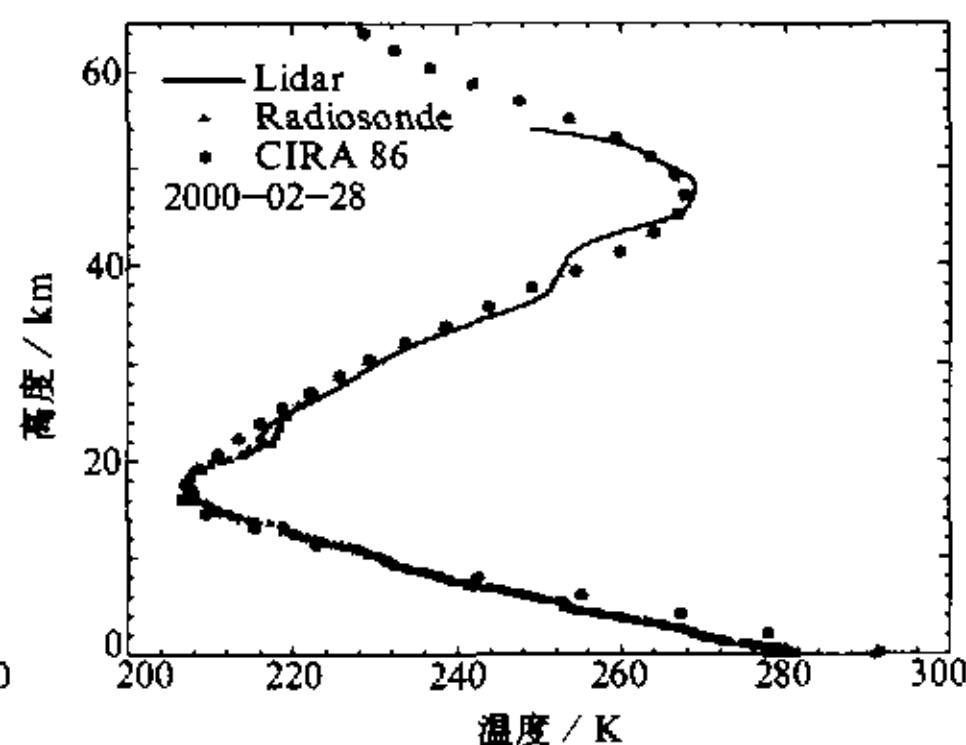


图 5 激光雷达和探空仪得到的温度分布

图 5 为该激光雷达与无线电探空仪在 2000 年 2 月 28 日晚的温度观测结果。在 22~28 km 范围内二者仍表现了较好的一致性, 它们的相对差别小于 2 K; 24 km 以下激光雷达的结果略为偏小。受当晚天气条件和激光能量的限制, 该激光雷达测量温度的最大高度约在 54 km 处。通过上述比较分析表明, 该激光雷达对观测温度的结果是合理的, 基本上反映出 22~60 km 范围内大气温度的垂直分布特点。

为了评估平流层低层气溶胶的影响, 我们进行了模拟计算分析。选择美国 1976 标准大气模式给出的温度及压力分布, 计算出分子的后向散射系数和消光系数; 两种不同的气溶胶模型如图 6 所示, 这里气溶胶散射比定义为气溶胶与分子的后向散射系数之和与分子的后向散射系数之比。气溶胶消光后向散射比取 50, 因此可以得到气溶胶的体后向散射系数和消光系数。由激光雷达的回波方程计算得到回波信号, 然后由方程 (1) 和 (2) 得到温度廓线。图 7 为模拟计算得到的温度和模式温度廓线。可以看出, 在平流层低层由于忽略气溶胶的后向散射影响, 模拟计算得到的温度值较模式值明显偏小; 而且气溶胶的后向散射系数越大, 模拟计算得到的温度值越偏小。对于气溶胶模型 a 而言, 在 20 km 处模拟计算的温度偏低了约 12 K, 30 km 处偏低了约 4 K。这与图 4~7 中激光雷达在平流层低层得到的温度偏低是一致的; 同时也表明对瑞利激光雷达探测温度而言, 忽略平流层低层气溶胶的影响往往会导致其温度结果偏低。



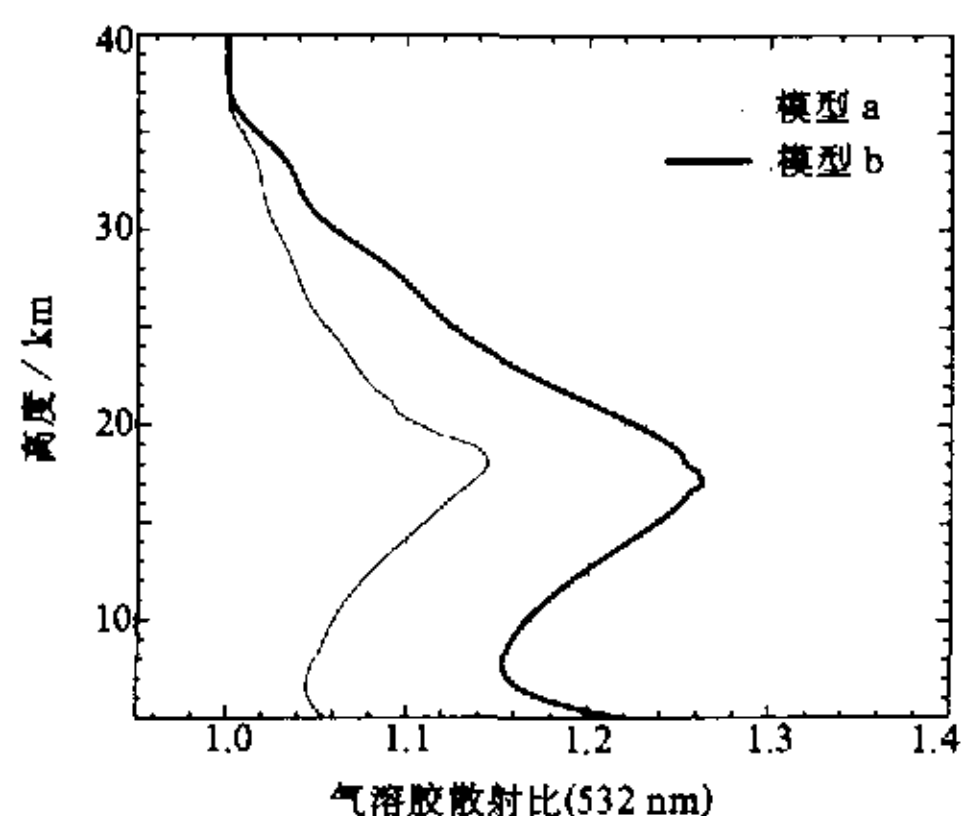


图6 数值模拟使用的气溶胶模型

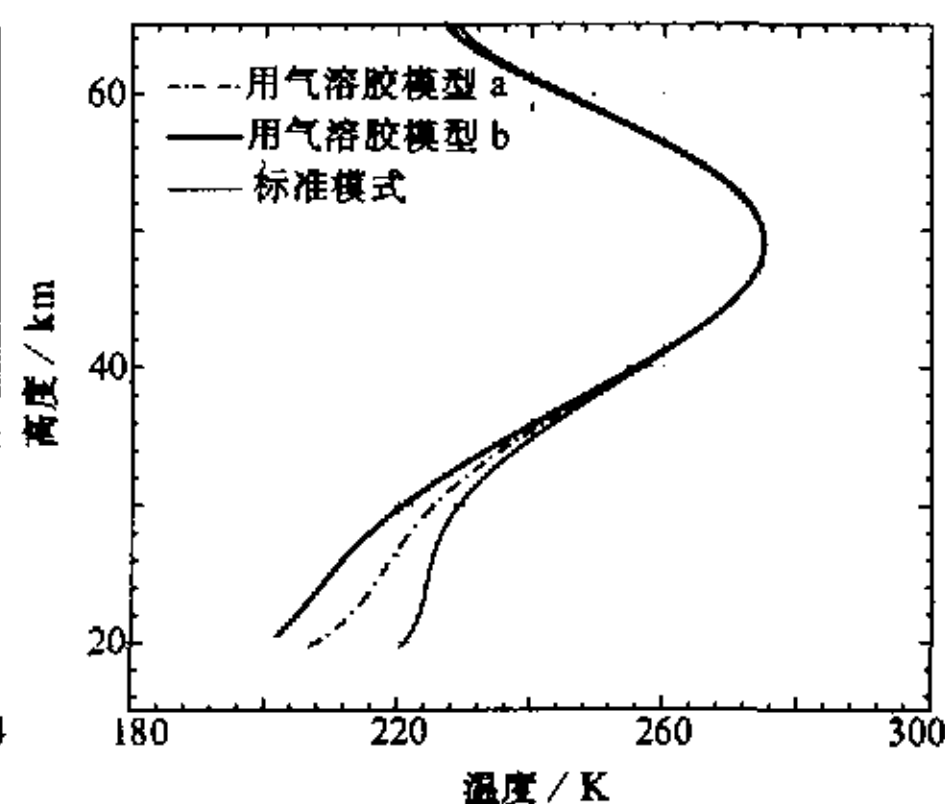


图7 模拟计算的温度和模式温度分布

## 4 小结

在平流层气溶胶相对干净的情况下, L625 瑞利激光雷达可以用于探测 22~60 km 范围内大气温度的分布廓线, 两种计算方法得到的温度分布基本一致。该激光雷达分别与 UARS/HALOE 和无线电探空仪的观测结果表现了较好的一致性。模拟分析表明, 当平流层低层气溶胶的后向散射较强时, 忽略它的影响会导致计算温度的结果明显偏低。下一步我们将通过提高激光束的能量来扩大测量的高度范围; 同时希望通过添加  $N_2$  分子 Raman 通道来得到平流层低层温度的分布<sup>[11]</sup>; 长时间的观测资料亦可用于提取重力波的信息。

**致谢:** 岳古明、金传佳和戚福弟等同志参加了该激光雷达的建立及常规观测; NASA/HALOE 小组提供了卫星数据; 马成胜高级工程师配合施放了无线电探空仪, 作者在此表示诚挚的感谢!

## 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 Hauchecorne, A., M. L. Chanin and P. Keckhut, Climatology and trends of the middle atmospheric temperature (33~87 km) as seen by Rayleigh lidar over south of France, *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(8), 15297~15309.
- 3 Finger, F. G., M. E. Gelman, J. D. Wild et al., Evaluation of NMC upper-stratospheric temperature analysis using rocketsonde and lidar data, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74**(5), 789~799.
- 4 胡欢陵, 王志恩, 吴永华, 周军, 紫外差分吸收激光雷达测量平流层臭氧, *大气科学*, 1998, **22**(5), 701~708.
- 5 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.
- 6 Hauchecorne, A. and M. L. Chanin, Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 75 km, *Geophys. Res. Lett.*, 1980, **7**(8), 565~568.

- 7 周军、岳古明、戚福弟、金传佳等, 大气气溶胶光学特性激光雷达探测, 量子电子学报, 1998, **15**(2), 138~145.
- 8 Fleming, E. L., S. Chandra and J. Barnett, Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as functions of latitude, *Adv. Space Res.*, 1990, **10**(2), 11~59.
- 9 Hervig, M. E., J. M. Russell III, L. L. Gordley et al., A validation of temperature measurements from the Halogen occultation experiments, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D6), 10330~10335.
- 10 郑文钢、李洪钧、杨国韬、龚顺生, 武汉上空大气密度和温度的激光雷达探测, 大气科学, 1999, **23**(4), 397~402.
- 11 Keckhut Philippe, M. L. Chanin and A. Hauchcorne, Stratosphere temperature measurement using Raman lidar, *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34), 5182~5186.

## Measurements of Thermal Profiles in the Stratosphere and Lower Mesosphere with Rayleigh Scattering Lidar

Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing, Zhou Jun and Zhang Min

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

**Abstract** A Rayleigh scattering lidar is introduced to measure the vertical distribution of atmospheric temperature over the altitudes of 22 to 60 km. Two kinds of algorithms for calculating temperature are investigated. Thermal profiles obtained by this Rayleigh Lidar agree very well with satellite UARS/HALOE and radiosonde observations. Numerical simulation is made to analyze the influence of aerosols on thermal profile in the lower stratosphere.

**Key words:** Rayleigh scattering; lidar; stratosphere; mesosphere; temperature