

文章编号: 0253-2239(2010)01-0019-07

# 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达

伯广宇 刘 博 钟志庆 周 军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 研制了一台瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达, 实现了对流层和平流层大气温度和密度的探测。作为多参数大气探测系统, 该激光雷达也实现了夜间至 25 km、白天至 5 km 高度气溶胶的探测能力; 其中激光雷达是探测平流层气溶胶最有效的手段之一。利用该激光雷达对目前合肥地区对流层温度、平流层逆温现象、对流层和平流层气溶胶做了探测和分析, 并给出若干典型结果。分析表明, 该激光雷达数据可靠, 可用于大气温度、密度、气溶胶的常规观测和分析研究。

**关键词** 激光技术; 激光雷达; 大气温度; 气溶胶; 大气密度

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0019

## Rayleigh-Raman-Mie Lidar for Atmospheric Temperature and Aerosol Profiles Measurement

Bo Guangyu Liu Bo Zhong Zhiqing Zhou Jun

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

**Abstract** A Rayleigh-Raman-Mie Lidar (RRML) has been developed for measuring atmospheric temperature, density and aerosol profiles. As a combined system, RRML has the ability to measure aerosol and cirrus up to 25 km at night and 5 km during daytime. Especially, lidar is the most efficient method in measuring stratospheric aerosol. Using RRML system, the change of tropospheric temperature, the inversion layer at stratosphere and the background aerosol at stratosphere has been detected in Hefei, China. The results indicate that measurements of RRML are reliable, and RRML can be employed for the routine observations and the analysis of atmospheric temperature and aerosol.

**Key words** laser technique; lidar; atmospheric temperature; aerosol; atmospheric density

### 1 引 言

大气温度是描述大气物理化学、天气动力学、气象及环境研究的基本参数之一<sup>[1]</sup>, 大气温度分布的变化会引起大气物理化学、动力学过程和微量成分分布的变化<sup>[2]</sup>, 探测大气温度和密度可以为天气分析及预报、大气环境和大气动力学过程等研究提供重要的数据<sup>[3]</sup>。

研究大气温度的变化趋势、天气过程分析和气候模式检验均离不开有效的温度观测手段<sup>[2]</sup>。目前, 气象部门主要使用无线电探空仪测量 30 km 以下高度的温度分布, 然而, 其时空分辨率易受风速的

影响, 并且探测高度受天气条件的制约。中层大气一般使用火箭探空或星载红外或微波辐射计探测, 但是, 火箭探空价格不菲, 因此不利于长期的观测; 而卫星探测的空间分辨率较低(千米量级)。拉曼和瑞利激光雷达在大气温度和密度探测的时空分辨率、探测高度、测量精度和长期连续的观测能力上, 具有很大的优势, 是其他遥感手段不能比拟的。近年, 国外已有应用 1~2 m 大口径望远镜和高功率激光器, 实现最大温度探测高度达 80 km 的瑞利激光雷达<sup>[4]</sup>、以及最大探测高度达 25 km 的拉曼激光雷达的报道<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2009-02-10; 收到修改稿日期: 2009-03-13

基金项目: 国家 973 计划(2006CB403702)资助课题。

作者简介: 伯广宇(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: boguangyu@sohu.com

导师简介: 周 军(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气探测方面的研究。E-mail: jzhou@aiofm.ac.cn

大气气溶胶和卷云则通过直接或间接效应影响地-气系统辐射收支平衡,对气候效应评估、大气环境及激光大气传输等研究具有重要意义,进行大气气溶胶光学特性的测量一直是气候、环境和大气科学等研究领域十分关心的问题,激光雷达为大气气溶胶和卷云的探测提供了有力的工具,国内外均开展了激光雷达探测气溶胶和卷云的相关工作<sup>[6]</sup>。

激光雷达,尤其是大型拉曼激光雷达和瑞利激光雷达,系统复杂、价格高昂,不利于激光雷达组网建设,因此,单台激光雷达高效综合多种手段来遥感大气参数,已受到了人们的重视。由于瑞利-拉曼-米氏(Rayleigh-Raman-Mie, RRM)激光雷达采用瑞利、拉曼、米氏散射等多种手段探测大气参数,提高了激光雷达的资料覆盖率,因此,研制结构紧凑的瑞利-拉曼-米氏激光雷达将有助于提高激光雷达的性价比,为我国激光雷达网组建的预先研究打下技术基础。

本文介绍一台中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的瑞利-拉曼-米氏温度、气溶胶和卷云探测激光雷达,首先叙述了各部分的技术结构和工作方法,给出激光雷达数据处理方法和典型的测量结果,然后将测量结果与其他激光雷达以及卫星数据

作对比分析,验证 RRM 激光雷达测量结果的可靠性,最后对合肥地区初步的温度和气溶胶测量结果做分析和讨论。激光雷达观测的大气温度、气溶胶和云的光学特性等资料,将为气象研究和大气环境评估、航空航天及军事应用提供重要的大气参数,并且有助于建设我国自主的大气模式<sup>[7]</sup>。地基激光雷达的探测资料,也可为卫星测量提供对比验证数据。

## 2 RRM 激光雷达的系统结构和探测方法

RRM 激光雷达垂直向大气中发射 532 nm 的脉冲激光,通过探测激光与大气相互作用的辐射信号来遥感大气。RRM 激光雷达通过测量气溶胶 532 nm 米氏散射信号,可以反演气溶胶后向散射系数廓线。通过测量氮气分子 607 nm 振动拉曼信号,可以反演对流层温度廓线,以及气溶胶消光系数、后向散射系数、消光后向散射比廓线。通过探测空气分子 532 nm 瑞利散射信号,可以反演平流层温度廓线。RRM 激光雷达主要包括激光发射单元、光学接收单元、信号检测和处理单元三部分,图 1 是系统的结构框图。

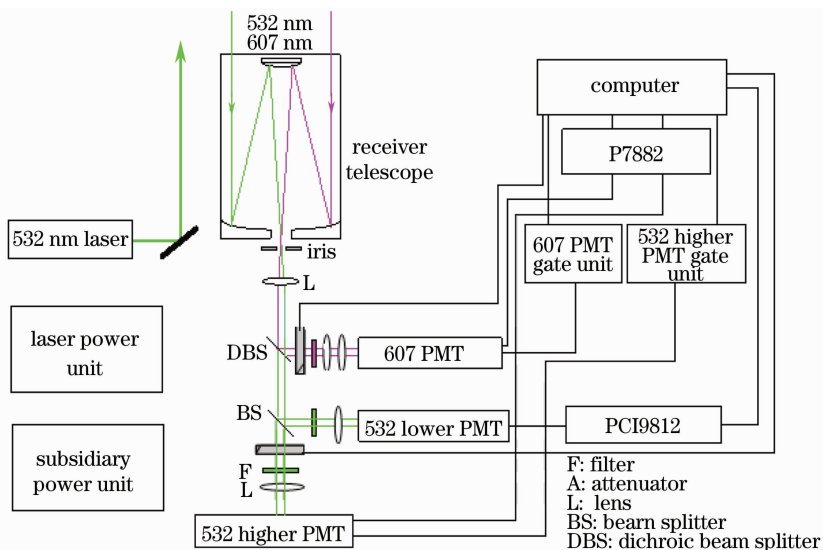


图 1 RRM 激光雷达系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of Rayleigh-Raman-Mie lidar

发射单元采用 Continuum 公司的 SureliteII 型激光器,波长 532 nm,单脉冲能 200 mJ,重复频率 20 Hz。接收望远镜使用 Meade 公司 350 mm 口径的卡塞格林望远镜,接收视场 2.5 mrad。532 nm 和 607 nm 回波光经望远镜小孔光阑和准直镜,通过 607 nm 波长全反(反射率大于 97%)、532 nm 波长

高透的分色镜(dichroic beam splitter)分离,607 nm 拉曼信号由 607 nm 通道接收,532 nm 光再经 96% 透射、4% 反射的分束镜(beam splitter)分为高低两路,分别被 532 nm 高层和低层通道接收。532 nm 通道和 607 nm 通道分别采用 0.5 nm 和 0.3 nm 带宽的滤光片。拉曼回波信号较气溶胶米氏散射回波

信号弱约三个量级,故要求 607 nm 拉曼通道对波长相邻的 532 nm 回波光有很强的截止能力,因此 607 nm 通道增加对 532 nm 光的截止片。

瑞利和拉曼高层回波信号很微弱,为提高其信噪比,需要采用高灵敏度、高量子效率的探测器和光子计数技术检测,故 607 nm 通道和 532 nm 高层通道采用滨松(Hamamatsu)公司的极高灵敏度、高增益的 R4632 型光电倍增管,信号采集选用 FAST ComTec 公司的 P7882 型光子计数卡。532 nm 低层通道信号检测采用 Hamamatsu 公司的 H5783 型光电倍增管,该型光电倍增管在低层大气气溶胶强回波信号的检测上有较高的性价比,信号采集采用 PCI-9812 型 A/D 数据采集卡。

RRM 激光雷达进行温度测量时,为防止低层大气的强回波信号引起探测器饱和,利用光电倍增管门控控制器,实现对光电倍增管开关门时刻的控制。探测 607 nm 通道拉曼信号的光电倍增管门控的开门高度一般为 2 km,探测 532 nm 高层通道瑞利信号的光电倍增管门控的开门高度一般为 20 km,可以保证 R4632 光电倍增管线性工作,同时避开低层气溶胶回波信号对分子瑞利信号的干扰。

当使用 532 nm 高层通道探测对流层气溶胶和高层卷云时,强回波信号会使 R4632 饱和,故需要在 532 nm 高层通道接收光路上加相应强度的衰减片,同时使 532 nm 高层通道的光电倍增管门控的开门高度为 5 km,保证 R4632 光电倍增管的线性,通过 532 nm 高低两个通道米氏散射回波信号的拼接,反演对流层气溶胶光学参数。通过控制 532 nm 高层通道的光电倍增管门控的开门高度为 10 km,结合对接收光路加相应强度的衰减片,可以实现对平流层气溶胶的探测能力。

### 3 大气温度的激光雷达探测结果

RRM 激光雷达建成后,在晴朗无云的夜晚进行了观测试验,观测地点位于合肥市西郊(31.9N, 117.17E)。选择 RRM 激光雷达 2008 年 11 月 20 日的温度观测结果,与中国科学院安徽光学精密机械研究所 L625 大型激光雷达(L625 拥有氮气 607 nm 拉曼信号及空气分子 532 nm 瑞利信号的探测能力)同时、同地点的观测结果,以及美国 Aura 卫星的微波临边探测器(Microwave Limb Sounder, MLS)传感器同一天在(31.13N, 113.22E)地点的观测结果作对比,验证 RRM 激光雷达的测量结果。

#### 3.1 对流层温度测量结果

氮气分子 607 nm 的拉曼散射回波不受气溶胶后向散射的影响,故利用拉曼信号,通过校正空气分子、气溶胶和臭氧透射率项的影响,可以反演氮气分子密度,通常认为大气中氮气分子的体积混合比为常数,从而得到空气分子密度,结合理想气体状态方程和大气静力学方程,使用 Shibata 方法<sup>[8]</sup>,反演出对流层大气温度,温度定标值使用(mass spectrometer incoherent scatter extended, MSISE)模式大气当日的温度值。

图 2(a) 给出 RRM 激光雷达拉曼信号当天 21:30(本文所用时间均为北京时间)的温度观测结果,信号采样的空间分辨率为 30 m,累积 40000 发激光脉冲,原始信号在扣除背景后,进行了平滑处理,10 km 以下信号平滑窗宽为 300 m,10 km 以上为 450 m,用以降低回波信号随机起伏带来的统计误差。作为对比,同时给出了 L625 激光雷达的氮气分子 607 nm 拉曼信号测量的对流层温度以及 MLS 卫星的观测结果。改造后的 L625 激光雷达,温度探测不是其主要功能。当天,L625 激光雷达拉曼信号温度测量高度不足 10 km,然而作为同地点、同时的观测,两台激光雷达之间的对比是很有意义的。分析图 2(a)的数据,可见两台激光雷达当日的观测结果较一致,一些细微的趋势变化都具有很好的一致性。RRM 激光雷达的观测的时间较 L625 激光雷达迟 2 h,由于地表辐射在日落后逐渐下降,造成近地表大气温度逐渐下降,因此 6 km 以下的温度观测结果较 L625 小约 1 K。

MLS 采用微波辐射计测量大气温度,空间分辨率较低,约为 3 km。图 2(b)为 RRM 激光雷达与 MLS 温度测量结果的偏差。由于测量地点的差异,加上 MLS 测量时间为 13:55 左右,此时地表辐射处在较大值,造成 10 km 以下的测量结果相差较大,最大差异在 6.12 km 处达到 7.8 K,随着高度的上升,大气温度受地表辐射影响逐渐减弱,MLS 与 RRM 激光雷达测量结果的差异逐渐减小,在 13.77 km 处只有 0.08 K。L625 激光雷达对合肥地区长期的温度观测指出,合肥地区自由对流层中温度分布变化较明显,尤其是 10 km 以下温度的变化幅度较大<sup>[2]</sup>。与 MLS 的测量结果相对比,RRM 激光雷达观测结果反映出近期合肥地区自由对流层温度变化符合 L625 的研究结果。

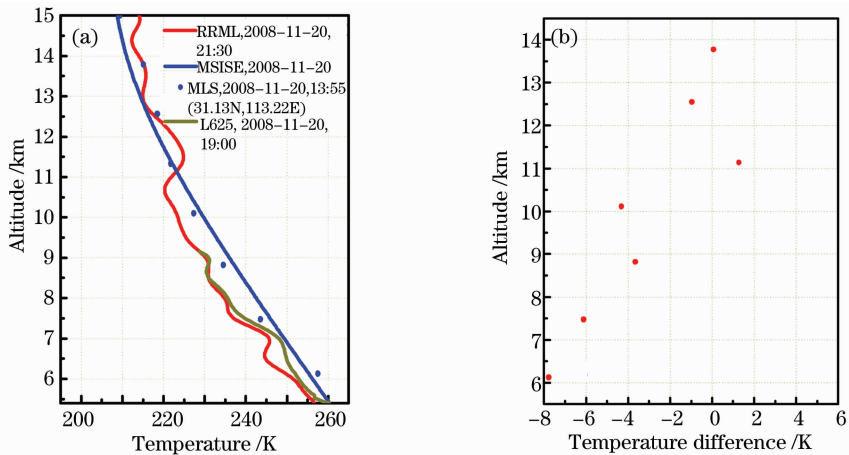


图 2 RMM 激光雷达、L625 激光雷达和 MLS 卫星探测的对流层温度分布

Fig. 2 Tropospheric temperature distributions measured by RRML, L625 and MLS

### 3.2 平流层温度测量结果

中层大气温度的观测手段较少,因此开展激光雷达观测平流层温度是非常有意义的。532 nm 大气回波信号包含气溶胶米氏散射和分子瑞利散射两个部分。利用瑞利散射激光雷达探测平流层中上部大气温度分布的原理是,认为平流层中上部 532 nm 回波信号主要是分子的瑞利散射信号,忽略气溶胶粒子的散射信号,通过校正空气分子透射率的影响,反演出分子密度,结合理想气体状态方程和大气静力学方程,使用 Shibata 方法,计算得到平流层中上部大气温度分布,温度定标值使用 MSISE 模式大气

当天的温度值。目前合肥地区平流层气溶胶处在背景期,相对比较清洁,可以认为 25 km 以上高度大气回波信号只包含瑞利散射信号。

图 3(a) 给出了 RRM 激光雷达瑞利信号 2008 年 11 月 20 日 22:30 的温度观测结果,信号采样的空间分辨率为 150 m,累积 40000 发激光脉冲,扣除背景后,对信号进行了平滑处理,平滑窗宽为 1.5 km。作为比较,同时给出了 L625 激光雷达的空气分子 532 nm 瑞利信号测量的平流层温度以及 MLS 卫星的观测结果。

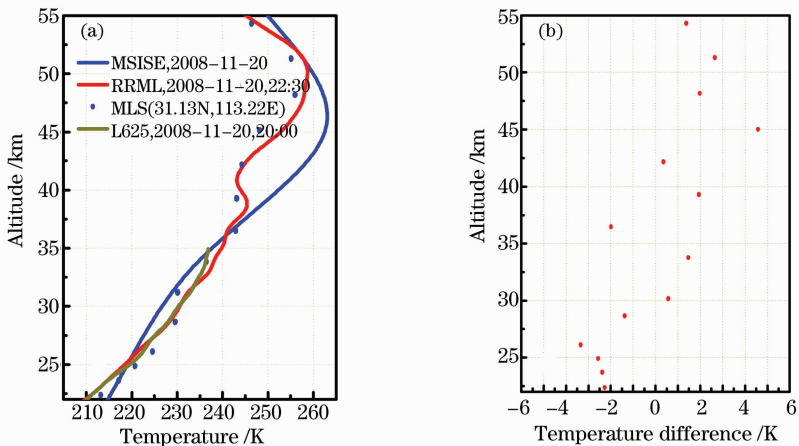


图 3 RMM 激光雷达、L625 激光雷达和 MLS 卫星探测的平流层温度分布

Fig. 3 Stratospheric temperature distributions measured by RRML, L625 and MLS

图 3(a)中,当日 L625 激光雷达的瑞利信号温度测量能力达到 35 km,分析图 3(a)的数据,两台激光雷达当天的观测结果有很好的一致性,22~32 km 最大差异 1.3 K,平均差异只有 0.4 K,这种差异是定标点不同造成的,分析表明两台激光雷达之间测量结果有很好的可比性。

RRM 激光雷达与 MLS 的观测结果对比显示,两者一致性很好,22~55 km 高度温度趋势的变化符合的很好。图 3(b)为 RRM 激光雷达与 MLS 当日温度测量结果的差异,与卫星的 14 个可比的观测值有 12 个与 RRM 激光雷达的差异在  $\pm 3$  K 之内,平均差异为 2 K,考虑到观测地点和时间的差异以

及 MLS 本身的测量误差等因素,上述分析表明 RRM 激光雷达的观测结果是可信的。

虽然目前合肥地区平流层相对比较清洁,图 3(a)反演结果表明,合肥地区 25 km 以下高度仍然存在少量的气溶胶,忽略它的影响引起 RRM 激光雷达和 L625 激光雷达在 22~25 km 的观测值较 MLS 测量值偏小。因此,若要利用对流层中上部以上高度的 532 nm 回波反演大气温度,必须根据 RRM 激光雷达测量的气溶胶散射比和消光系数,对 10~25 km 的 532 nm 回波信号进行气溶胶后向散射项和透射率的校正。这样可以测量 5~5 km 高度范围内的温度。

重力波是中高层大气最重要的动力学过程之一,重力波在大气中的活动可以通过大气密度或温度的相对起伏表征。瑞利激光雷达通过探测平流层大气温度和密度的扰动变化,能够得到高分辨率的大气重力波活动的信息,对中小尺度的大气波动过程研究具有重要的意义。图 4 给出了 RRM 激光雷达 2008 年 11 月 25 日平流层温度测量结果,激光雷达发现在 50 km 附近出现逆温层结构(箭头处)。合肥地区这种中间层低层的逆温结构经常被探测到<sup>[2]</sup>,它与行星波和重力波的活动密切相关。通过激光雷达长期的观测,可以研究与大气重力波活动的相关信息<sup>[9]</sup>。

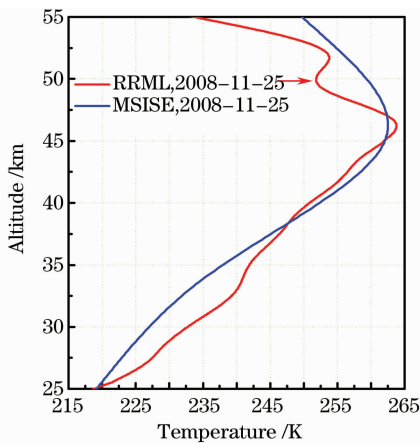


图 4 RRM 激光雷达探测的平流层温度分布

Fig. 4 Atmospheric temperature distributions of stratosphere measured by RRML

#### 4 激光雷达探测大气气溶胶结果分析

RRM 激光雷达具备对流层气溶胶参数的探测能力。图 5(a)给出了 2008 年 12 月 1 日 18:15 测量的大气气溶胶后向散射系数垂直分布,当天晴朗无云,信号检测累积 10000 发激光脉冲,信号采样的空

间分辨率为 30 m,回波信号由 532 nm 高、低两个通道拼接获得。使用 Fernald 方法<sup>[10]</sup>,反演气溶胶后向散射系数,气溶胶消光后向散射比取 50 sr,分子消光后向散射比取  $8\pi/3$  sr,标定点处的气溶胶散射比取 1.01,空气分子后向散射系数采用 30N 美国冬/夏季标准大气模式,根据瑞利散射理论计算获得。作为对比,给出了安徽光学精密机械研究所双波长、双视场(dual-wavelength lidar, DWL)米氏散射激光雷达同地点的测量结果。对比两条廓线可以看出,两者整体结构吻合很好,其中 1~3 km 的测量结果相吻合,3~6 km 由于标定点不同、测量时间的差异以及 RRM 激光雷达高低层的拼接区选择在这里,引起测量结果的差异。在 1~10 km 上,RRM 激光雷达测量结果与 DWL 激光雷达的平均相对误差小于 15%,说明 RRM 激光雷达具备对流层大气气溶胶后向散射系数进行观测的能力。

RRM 激光雷达 532 nm 低层通道具有白天探测气溶胶的能力,图 5(b)给出了 2009 年 1 月 18 日 15 点气溶胶后向散射系数的测量结果。这种观测能力使 RRM 激光雷达可对气溶胶进行昼夜连续的观测,适合研究大气颗粒物消光、大气边界层光学厚度的变化,实时监测城市上空大气颗粒污染物的空间结构分布、时间演变特征。

平流层气溶胶是影响地球大气系统辐射收支的一个重要的不确定因素,激光雷达是探测平流层气溶胶最有效的手段之一<sup>[11]</sup>。RRM 激光雷达 532 nm 高层通道使用的 R4632 光电倍增管灵敏度很高,信号检测采用光子计数技术,因此 532 nm 高层通道探测平流层气溶胶可以获得较理想的结果。图 6 给出 RRM 激光雷达 532 nm 高层通道平流层气溶胶测量的结果。图 6(a)是 2009 年 1 月 10 日 RRM 激光雷达与 DWL 激光雷达测量结果的对比图,两台激光雷达均累积 10000 次激光脉冲,信号采样的空间分辨率均为 30 m。两台激光雷达的测量结果整体趋势上吻合很好, DWL 激光雷达因信噪比不足,故反演结果出现一定程度的振荡, RRM 激光雷达反演结果较理想。

图 6(b)给出了 2009 年 1 月 10 日、14 日和 2 月 4 日 RRM 激光雷达平流层气溶胶典型的测量结果,10 日、14 日这两天合肥地区对流层上部 13~15 km 处气溶胶后向散射系数较小,对应一个相对较干净层,此高度上的干净层在合肥地区也经常被探测到<sup>[2]</sup>,可能与合肥地区对流层顶的活动有关。分析图 6(b)的数据可见,气溶胶后向散射系数在 18 km 左右达到最大,合肥地区平流层气溶胶

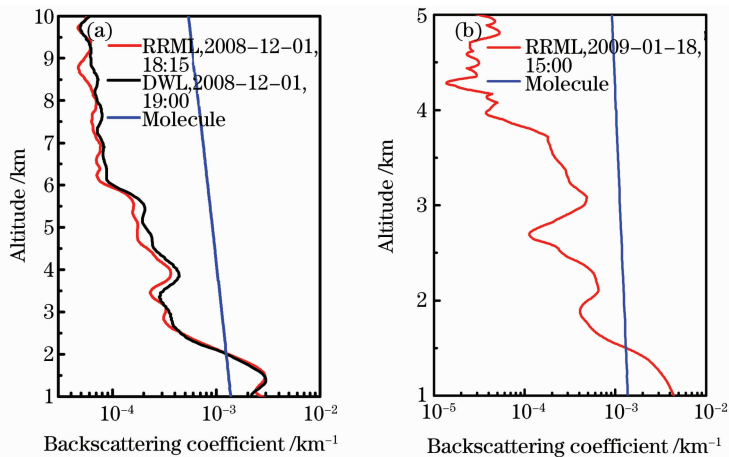


图 5 RRM 激光雷达探测的对流层气溶胶后向散射系数分布

Fig. 5 Backscattering coefficient distributions of troposphere atmospheric aerosol measured by RRML

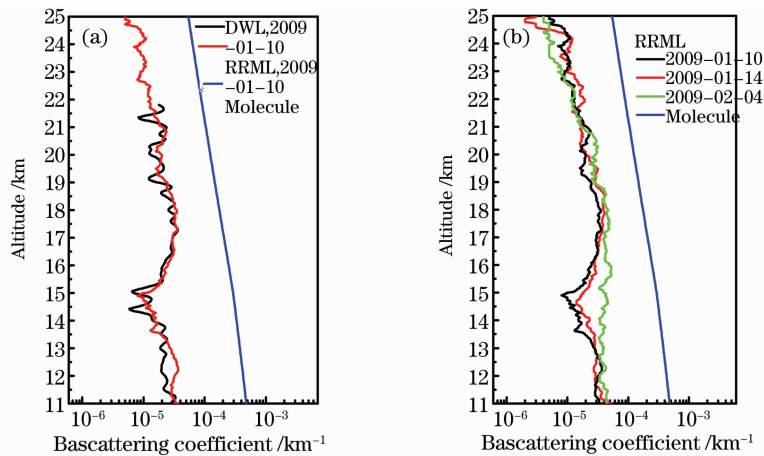


图 6 RRM 激光雷达探测的平流层气溶胶后向散射系数分布

Fig. 6 Backscattering coefficient distributions of stratosphere atmospheric aerosol measured by RRML

Junge 层在这个高度上, Junge 层以上的气溶胶后向散射系数随高度升高而递减, 至 25 km 气溶胶含量已经很小。RRM 激光雷达的初步观测显示, 目前合肥地区平流层气溶胶受人工因素的影响比较小, 后向散射系数变化不大, 平流层气溶胶处在背景期<sup>[11]</sup>。以上分析表明 RRM 激光雷达可以有有效的探测平流层气溶胶空间分布的特点。

## 5 结 论

RRM 激光雷达实现了对流层和平流层大气密度、温度的探测, 其中激光雷达是获得高时空分辨率的中层大气参数最强有力的手段<sup>[12]</sup>。RRM 激光雷达可用于大气边界层、对流层和平流层气溶胶以及高卷云等空间结构和时间演变特征的常规观测。RRM 激光雷达的 607 nm 拉曼通道还可以完成对气溶胶消光系数、消光后向散射比(激光雷达比)廓线的探测, 利用激光雷达比的大小对气溶胶有效半

径的依赖性, 可实现对气溶胶粒子尺度谱的初步识别。实现了一台激光雷达多种手段探测多种大气组分, 提高了激光雷达的性价比。

**致谢** 作者诚挚的感谢 Aura/MLS 研究组提供的卫星数据。

## 参 考 文 献

- 1 M. R. Gross, T. J. McGee, R. A. Ferrare *et al.*. Temperature measurements made with a combined Rayleigh-Mie and Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 5987~5995
- 2 Wu Yonghua. Lidar Measurements of Temperature and Aerosol of Atmosphere [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002  
吴永华, 激光雷达探测大气温度和气溶胶[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002
- 3 Liu Jun, Hua Dengxin, Li Yan. Rotational raman lidar for daytime-temperature profiling of the atmospheric boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 755~759  
刘 君, 华灯鑫, 李 言. 大气边界层白天温度测量用转动拉曼激光雷达[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 755~759
- 4 R. J. Sica, S. Sargoytchev, P. S. Argall *et al.*. Lidar

- measurements taken with a large-aperture liquid mirror. 1. Rayleigh-scatter system [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30): 6925~6936
- 5 P. Keckhut, M. L. Chanin, A. Hauchecorne. Stratosphere temperature measurement using Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34): 5182~5186
- 6 Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1412~1417  
周 军,岳古明,金传佳 等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1412~1417
- 7 Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi *et al.*. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements[J]. *Chinese J. of Quant. Electron.*, 1998, **15**(2): 140~147  
周 军,岳古明,戚福第 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 140~147
- 8 T. Shibata, M. Kobuchi, M. Maeda. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with XeFlidar [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(5): 685~688
- 9 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Rayleigh-Raman scattering lidar for atmosphere temperature profiles measurements[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 851~856  
吴永华,胡欢陵,胡顺星 等. 瑞利-喇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 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 11 Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Measurements of stratosphere aerosol with L625 Lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1012~1015  
吴永华,胡欢陵,周 军 等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1012~1015
- 12 Lü Daren, Chen Hongbin. Advances in middle atmosphere physics research[J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(4): 750~769  
吕达仁,陈洪滨. 平流层和 中 层 大 气 研 究 的 进 展[J]. *大气科学*, 2003, **27**(4): 750~769