

# 西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的 微脉冲激光雷达测量\*

刘 诚<sup>1</sup> 明 海<sup>1</sup> 王 沛<sup>1</sup> 谢建平<sup>1</sup> 杨 辉<sup>2</sup> 赵南京<sup>2</sup>  
谢品华<sup>2</sup> 竹内延夫<sup>3</sup> 小池俊雄<sup>4</sup>

(1 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(3 日本千叶大学环境遥感中心, 千叶 263-8522)

(4 日本东京大学, 东京 113-8656)

**摘 要** 用微脉冲激光雷达对西藏那曲地区和北京郊区 2004 年夏季大气对流层气溶胶的光学特性进行了测量和分析, 给出了两地区气溶胶消光系数的垂直分布以及那曲地区的大气边界层高度。结果表明: 北京郊区大气对流层气溶胶的组分、浓度及粒径分布较那曲地区呈现出较大的不均匀性, 那曲地区则具有较好的近地面空气质量。因此, 利用微脉冲激光雷达可以实现大气气溶胶的有效测量。

**关键词** 微脉冲激光雷达(MPL); 气溶胶; 消光系数; 边界层高度

中图分类号 P407.5 文献标识码 A

## 0 引言

气溶胶是指液体或固体微粒均匀散布在气体中形成的相对稳定的悬浮体系, 大气中的气溶胶在气体变化中扮演着十分重要的角色, 因此对大气气溶胶的探测具有重要的意义<sup>[1]</sup>。微脉冲激光雷达(MPL)以它的高测量准确度、高时间和空间分辨率以及大的探测范围而成为当前一种重要的主动遥感工具, 被广泛应用于大气气溶胶的探测<sup>[1~4]</sup>。利用激光雷达对南极和北极地区的大气气溶胶观测已开展多年, 但在号称第三极的青藏高原仅有北京大气物理所的石广玉和日本名古屋大学的岩坂联合在拉萨(海拔 3600 m)观测过一次<sup>[1]</sup>。文中利用 MPL 对青藏高原那曲地区(海拔约 4600 m)和北京郊区大气对流层气溶胶进行了观察。结果表明由于青藏高原幅员辽阔, 海拔高, 工业污染少, 其气溶胶特征与我国内地有较大的差异。因此, 利用激光雷达对青藏高原的气溶胶时空分布进行探测具有很高的科学意义和实用价值。本文工作中是中日联合开展的 CAMP-Tibet 考察中的一部分。

## 1 MPL 激光雷达系统

激光雷达是无线电(微波)雷达向光学频段的扩展, 它以激光为光源, 探测激光与大气相互作用的回

波信号。利用适当的数据反演方法从回波信号中获得气体分子和气溶胶粒子的信息。图 1 是在本次观测中所采用的 MPL<sup>[4]</sup>激光雷达原理图。整个系统可分为激光发射系统、光学接收系统和信号检测系统三大部分。

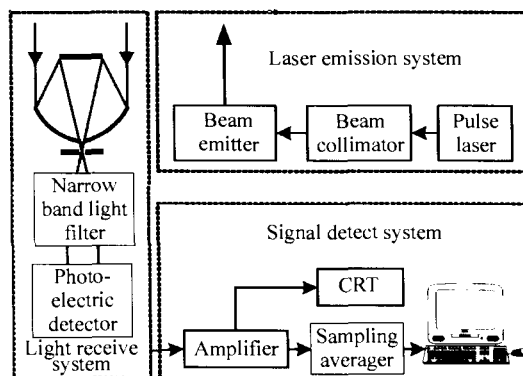


图 1 MPL 系统体的原理图

Fig. 1 Schematic of the MPL system

激光发射系统包括脉冲激光器、光束准直器和光束发射器。采用 Nd:YLF 二倍频 523 nm 输出波长作为激发光源, 因其具有体积小、重量轻、性能稳定, 给外场试验带来了很大的便利, 其单脉冲能量约 10  $\mu$ J, 重复频率 2500 Hz, 不仅有利于人眼安全, 而且可以消除低频噪音, 提高信号探测的信噪比; 激光经光束准直与发射器发射到大气中与大气气溶胶或云相互作用。光学接收系统包括一反射式卡塞格林望远镜、窄带滤光片和光电探测器; 由望远镜接收来自大气气溶胶或云的激光后向散射回波信号, 经窄带滤光片(带宽 0.1 nm)和准直透镜后由光电探

\* 国家自然科学基金(10274080)资助

Tel: 0551-5591040 Email: liucheng@hficas.ac.cn

收稿日期: 2005-05-19

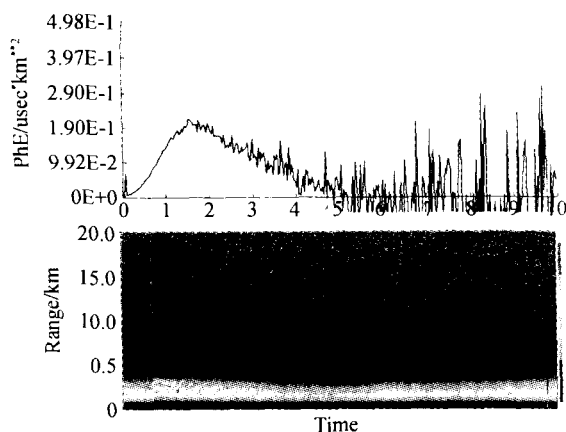


图2 激光大气回波的时空分布图

Fig.2 Back-scattering signal from the atmosphere

探测器进行信号探测,光电探测器采用雪崩光电二极

管(APD),因其体积小、重量轻、工作电压低、响应速度快、动态范围大以及高的性价比,成为当前被广泛使用的光电探测器件. 信号检测系统包括前置放大器、采样平均器及计算机,APD 记录的信号经放大与滤波后由计算机进行处理,并实时显示数据结果,如图 2. 与使用探空仪相比,利用激光雷达可以实现全天候连续探测,实时记录大气气溶胶的时空分布.

## 2 数据处理算法

对单波长激光雷达,在一次散射条件下,根据 Mie 散射雷达方程<sup>[2]</sup>,本文采用 Fernald 方法<sup>[5]</sup>来进行 MPL 测量数据的反演. 由此求得气溶胶消光系数的后向积分解和前向积分解分别为

$$\alpha_a(z) = -S\alpha_m(z) + \frac{X(z) \exp [2(S-1) \int_z^z \alpha_m(z') dz']}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + S\alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z) \exp [2(S-1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz''] dz'} \quad (1)$$

$$\alpha_a(z) = -S\alpha_m(z) + \frac{X(z) \exp [-2(S-1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz']}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + S\alpha_m(z_c)} - 2 \int_z^{z_c} X(z) \exp [-2(S-1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz''] dz'} \quad (2)$$

式中,  $\alpha_a(z)$  为距离  $z$  处大气气溶胶的消光系数 ( $\text{km}^{-1}$ );  $\alpha_m(z)$  为距离  $z$  处空气分子的消光系数 ( $\text{km}^{-1}$ ), 它可以根据实时的气象探空资料或由大气模式利用瑞利散射理论得到;  $z$  为探测距离;  $X(z)$  和  $X(z_c)$  分别为探测距离  $z$  和标定点  $z_c$  高度处雷达回波信号强度, 通过接收距离  $z$  和标定点  $z_c$  处的大气后向散射回波信号功率经过距离修正得到;  $S = S_a/S_m$ ,  $S_a$  为气溶胶消光后向散射比, 其值随气溶胶浓度、尺度谱分布和化学成分的变化而变化, 文中取  $S_a = 40 \sim 50 \text{ sr}^{[5,6]}$ ;  $S_m$  为大气分子的消光后向散射比,  $S_m = 8\pi/3 \text{ sr}$ ;  $z_c$  为标定点高度, 通过选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度来确定, 在此高度上满足气溶胶散射比  $R(z_c) = (\beta_a(z_c) + \beta_m(z_c))/\beta_m(z_c) = 1.01$ . 根据激光雷达的探测能力和边界层气溶胶分布一般特性, 本文在 4~8 km 高度范围内进行迭代计算.  $\alpha_a(z_c)$ ,  $\alpha_m(z_c)$  分别为标定点上的气溶胶和大气分子的消光系数.

## 3 观测结果及分析

### 3.1 气溶胶分析

北京郊区观测地点位于距市区约 30 km 的顺义县境内的区牛栏山(北纬约 40.17°N, 东经约 116.50°E), 海拔 55 m; 那曲观测地点位于西藏那曲县境内的那

曲高原上(北纬 31.37°N, 东经 91.90°E), 海拔 4534 m. 文中那曲地区的大气分子后向散射系数和消光系数的垂直分布通过当地气象探测数据计算得出, 北京地区的相应值由标准大气模式得到.

图 3 给出了北京郊区 2004 年 9 月 12 日夜间零时和中午 12 时气溶胶消光系数的垂直分布. 由图可见, 在北京城区对流层内, 分布着密度较大的气溶胶层, 有明确的顶部边界, 且气溶胶含量呈现出明显的多层结构. 对所探测的这两个时刻, 在近地面层, 高度约 60~120 m 处, 气溶胶粒子消光系数小于大气分子的消光系数数值, 存在一个明显的洁净层. 在

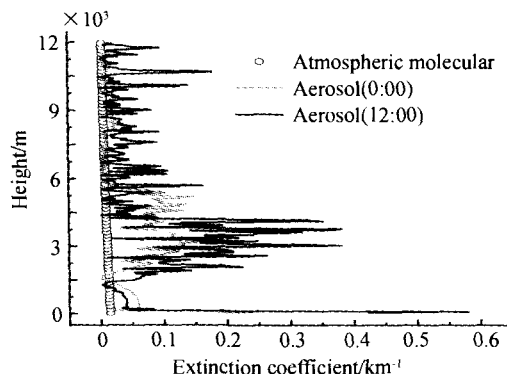


图3 北京郊区气溶胶消光系数垂直分布

Fig.3 The aerosol extinction coefficient vertical distribution of Beijing

对流层底部总存在一个明显的气溶胶混合层,其高度为 255 m~1705 m,该混合层也可称为污染边界层. 从图中还可以看出北京上空中午气溶胶消光系数的多层复杂结构较夜间大,这是由于白天地表接收太阳辐射后被加热,边界层内的湍流运动使得热量向上传输,空气处于不稳定状态;夜间地表因长波辐射冷却后,热量向下,大气处于稳定层结构状态. 而且白天气溶胶消光系数值明显大于夜间,这是由于白天人类的活动和生产过程导致大量气溶胶的产生所致.

图 4 为 2004 年 10 月 2 日零点(“十一”假期)与 9 月 12 日零点测量的北京郊区上空大气气溶胶消光系数的垂直分布比较图. 由图可知,9 月 12 日零点北京郊区气溶胶消光系数的多层复杂结构和平均值都较 10 月 2 日大,这是因为假期期间企业停止工作,使得排向大气中的气溶胶浓度组分减少所致.

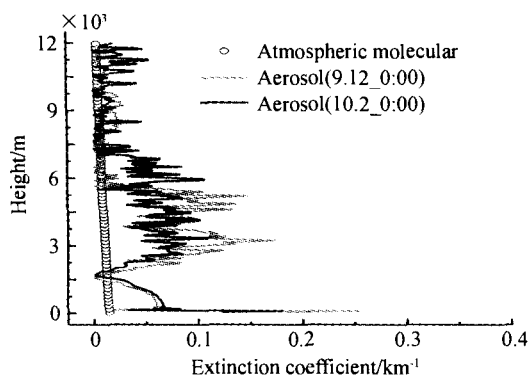


图 4 北京郊区气溶胶消光系数垂直分布  
Fig. 4 The aerosol extinction coefficient vertical distribution of Beijing

在青藏高原那曲地区观测点于 2004 年 8 月 16 日观测了气溶胶的分布特性,如图 5. 比较图 5 和图 4 会发现这两幅图有着相似的结构:1)在那曲高原对流层内气溶胶含量也存在着多层结构;2)在近地面层,气溶胶粒子消光系数小于大气分子的消光系数值,

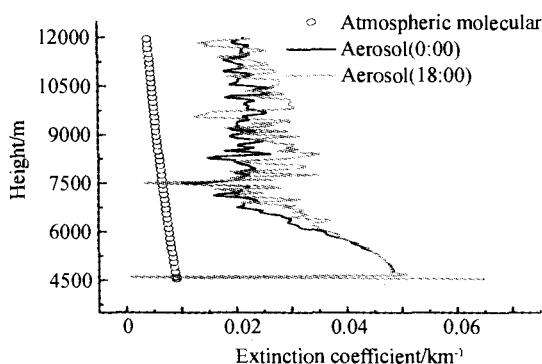


图 5 那曲地区气溶胶消光系数垂直分布  
Fig. 5 The aerosol extinction coefficient vertical distribution of Naqu

存在一个明显的洁净层;3)在对流层底部总存在一个明显的气溶胶混合层;4)那曲上空中午气溶胶消光系数的多层复杂结构和平均值都较夜间大. 但那曲地区白天与夜间气溶胶消光系数的多层复杂结构和平均值相差程度小于北京. 这是由于北京的人类活动和工厂比那曲密集所致.

为了更清楚的看出这一现象,在图 6 中比较了 2004 年夏季北京郊区与那曲地区夜间气溶胶消光系数的垂直分布. 为了便于比较分析,将北京上空气溶胶消光系数的垂直分布作了相应的变化,即以地面为垂直高度基准,将那曲地区地面高度调整到与北京地区相同海拔高度. 从图中可以看出:1)北京郊区上空气溶胶消光系数的多层复杂结构比那曲地区大的多,这是因为北京的工厂和人类活动较那曲多,从而导致气溶胶的组分、浓度及粒径分布较那曲呈现更大的不均匀性;2)北京上空气溶胶消光系数平均值明显大于那曲,表明了那曲地区的近地面空气质量明显优于北京郊区.

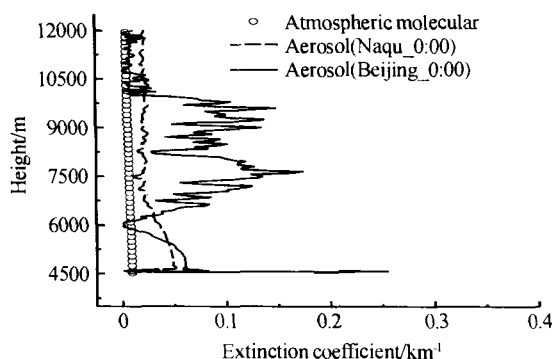


图 6 2004 年北京(9 月 12 日)与那曲(8 月 16 日)夜间气溶胶消光系数垂直分布  
Fig. 6 The aerosol extinction coefficient vertical distribution in Beijing (Sep. 12, 2004) and Naqu (Aug. 16, 2004)

### 3.2 大气边界层高度的确定

大气边界层高度是近地面大气对流混合所能达到的高度,它与上面自由大气交界部分为一个逆温层. 目前,通过实测资料确定边界层高度的方法是用探空资料获得的位温廓线来获得边界层高度信息,此种方法切实可行而且具有一定可靠性,但缺点是无法进行连续观测. 利用声雷达和气象塔探测大气边界层,虽然可以做到连续测量,但探测的高度不够. 而激光雷达恰好能够克服这些缺点,根据激光雷达所测信号反演得到的气溶胶消光系数对应着探测高度的气溶胶浓度,消光系数越大,则该高度处的气溶胶浓度越大. 通常在大气边界层与上层自由大气的交界处,气溶胶消光系数迅速减弱. 大气边界层的高度可通过气溶胶消光系数的最大突变  $-d[\alpha_a]/dz$  (即最大递减率)所在的高度来确定. 图 7 为反演计算后得到的实验结果. 近似白线轮廓为大气边界层.

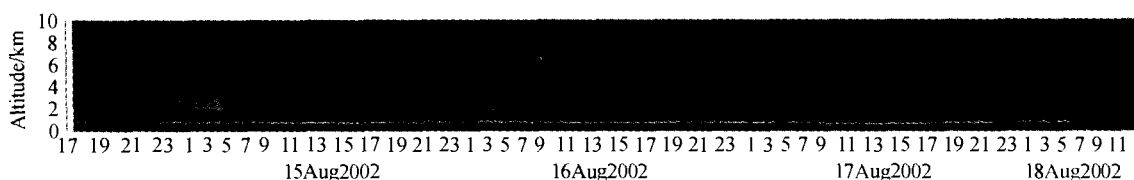


图 7 2002 年 8 月那曲地区大气边界层高度  
Fig. 7 The heights of planetary boundary layer of naqu at august 2002

从图中可知那曲 8 月份的大气边界层高度约为 1.1km, 比较稳定; 而那曲 2004 年 4 月份的大气边界层高度变化很大, 约为 1.3km~2.3km. 这是青藏高原特殊的地形所致, 由于其海拔高, 日照强烈, 白天地表接收太阳辐射后被加热急剧升温, 夜间地

表因长波辐射冷却后迅速降温, 昼夜温差较大, 尤其是春季, 强烈的热力作用造成 4 月份的湍流交换远高于 8 月. 因此, 青藏高原 8 月份的大气边界层比 4 月稳定的多.

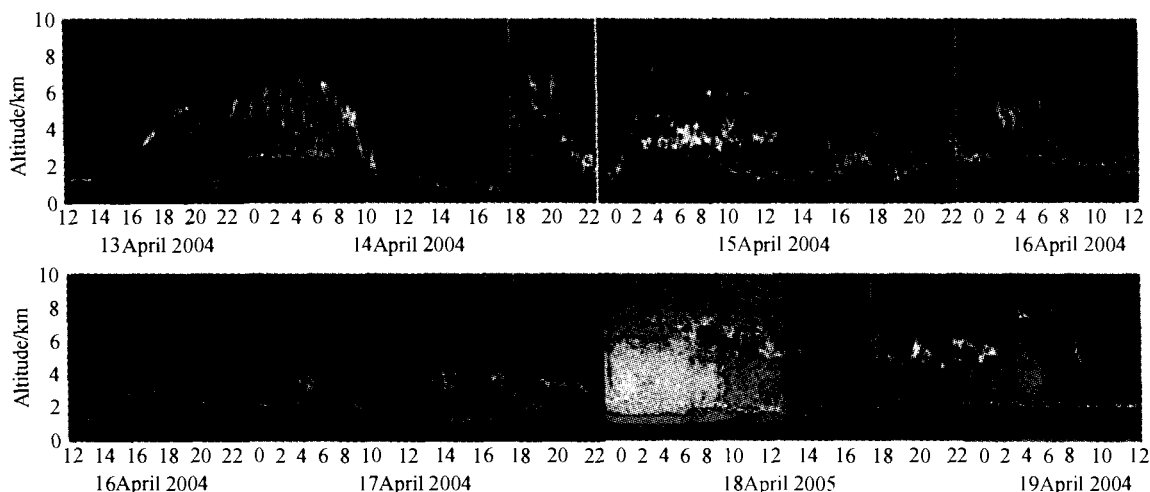


图 8 2004 年 4 月那曲地区大气边界层高度  
Fig. 8 The heights of planetary boundary layer of naqu at april 2004

### 4 结论

利用 MPL 激光雷达于 2004 年夏季在西藏那曲和北京郊区测量并分析了大气气溶胶的分布特性, 给出了两测量站点上空大气对流层气溶胶消光系数的垂直分布, 并据此确定了那曲地区的大气边界层高度. 结果表明北京郊区大气气溶胶的组分、浓度及粒径分布较那曲呈现出更大的不均匀性, 且那曲地区的近地面空气质量明显优于北京郊区. “十一”假期期间北京郊区气溶胶浓度较平时工作日小, 表明企业排放和人们活动是城市上空大气气溶胶的一个主要来源. 观测结果同时表明, MPL 激光雷达是大气气溶胶的一种高效的探测工具.

#### 参考文献

1 白宇波, 石广玉, 田村耕一, 等. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测. 大气科学, 2000, **24**(4): 559~567

Bai Y B, Shi G Y, Koichi T, et al. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, **24**(4): 559~567

2 邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测. 大气科学, 2003, **27**(1): 1~7

Qiu J H, Zheng S P, Huang Q R, et al. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(1): 1~7

3 姜兴山, 陈建新. 激光雷达及其应用. 佳木斯大学学报, 2000, **18**(1): 93~96

Jiang X S, Chen J X. *Journal of Jiamusi University*, 2000, **18**(1): 93~96

4 Spinhirne J D. Micro pulse lidar. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**(1): 48~54

5 Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 211~220

6 Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments. *Applied Optics*, 1984, **23**(5): 652~655

## Measurements of the Aerosol Over Naqu of Tibet and Suburb of Beijing by Micro Pulse Lidar (MPL)

Liu Cheng<sup>1</sup>, Ming Hai<sup>1</sup>, Wang Pei<sup>1</sup>, Xie Jianping<sup>1</sup>, Yang Hui<sup>2</sup>,

Zhao Nanjing<sup>2</sup>, Xie Pinhua<sup>2</sup>, N. Takeuchi<sup>3</sup>, T. Koike<sup>4</sup>

<sup>1</sup> University of Science and Technology of China, Hefei 230036

<sup>2</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

<sup>3</sup> CERes, Chiba University, Chiba 263-8522

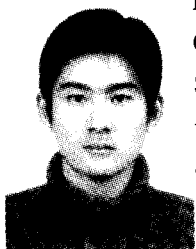
<sup>4</sup> Tokyo University, Tokyo 113-8656

Received date: 2005-05-19

**Abstract** The optical characteristics of aerosol over Naqu and the suburb of Beijing in combination with Micro Pulse Lidar (MPL) were measured and analyzed. The vertical distribution of aerosol extinction coefficients over the Naqu was showed in comparison with the results over the suburb of Beijing and the heights of Planetary Boundary Layer of Naqu are discussed. The results indicates that the components and concentration of aerosol are more uneven in Beijing than in Naqu, and the quality of air is better in Naqu than in Beijing. Consequently, MPL is a useful tool for monitoring aerosol in atmosphere.

**Keywords** Micro Pulse Lidar (MPL); Aerosol; Extinction coefficients; Planetary Boundary Layer height

**Liu Cheng** was born in 1981 in Anhui Province, China. He received the B. S. degree from Changchun University of Science and Technology in 2004. In 2003, he studied for his M. S. degree in Dept. of Physics, University of Science and Technology of China. His main work focuses on the aerosol retrieval with MPL, the regional cloud distribution of cloud characterization retrieved from NOAA-AVHRR satellite data and dual-site lidar observation.



### 《光子学报》2007 年征订启事

《光子学报》由中国光学学会、中国科学院西安光学精密机械研究所主办,中国科学出版社出版,国内外公开发行人。主要刊登本学科的学术论文、研究简报、研究快报,内容涉及光学,尤其是激光技术、瞬态光学、光电子学、光学仪器、波导与集成光学、信息光学、非线性光学、二元光学、光子晶体、红外、半导体光学、光谱学、薄膜光学、全息、光物理、光化学、光生物学、光通信、光学传感器、光子功能材料、光子自身相互作用、光子的经典与非经典效应等。

读者对象:从事光学、光子学及相关学科的科学研究人员、工程技术人员和高等院校师生。

本刊载文已被国内外多家数据库收录,并被著名检索刊物 EI(检索率 100%)、SA(PA、EEA)、《INSPEC》、CA、PЖ、CSCD 作为固定收录源刊。

本刊为物理学类、无线电电子学、电信技术类国家核心期刊。

本刊邮发代号 52-105,月刊,每期 192 页,大 16 开,定价:30 元/期。

若直接从编辑部征订,可获得八五折优惠,并可免费阅览和下载 2007 年全年电子版。