

文章编号: 0253-2239(2009)02-0292-05

北京城区限车期间气溶胶特征激光雷达观测研究

董云升 刘文清 刘建国 谢品华 陆亦怀 张天舒 赵雪松 韩道文 刘增东 黄书华

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 用微脉冲激光雷达(MPL)研究了机动车限行措施对城市大气污染影响。2007年8月北京市车辆限行期间,对近地面层气溶胶的光学特性进行连续立体监测,在对激光雷达系统及其数据处理方法讨论的基础上,反演了近地面层气溶胶消光系数、大气边界层高度以及颗粒物质量浓度的时空变化,通过和未限行期间近似气象条件下观测数据的分析比较,发现限行期间颗粒物质量浓度呈现下降趋势,监测区域上空大气污染层厚度减小,证明车辆限行减排是一项减轻城市大气污染的有效措施,为我国城市空气污染治理提供了科学依据和参考。

关键词 激光雷达; 气溶胶; 大气边界层; 气溶胶质量浓度

中图分类号 X831.03 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092902.0292

Lidar Study of the Aerosol Characteristic in Beijing During Traffic Controlled

Dong Yunsheng Liu Wenqing Liu Jianguo Xie Pinhua Lu Yihuai Zhao Xuesong
Han Daowen Zhang Tianshu Liu Zengdong Huang Shuhua

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

Abstract The effect of traffic controlled on the air pollution in city was studied by micro pulse lidar (MPL). The optical characteristic of subaerial aerosol over Beijing was monitored continually with MPL in August of 2007. The system structure and technical parameters of MPL were presented and the data-processing method was discussed, the time-space distribution of aerosol extinction coefficients, heights of planetary boundary layer (PBL) and aerosol mass concentration were showed and compared with the results which were measured in the similar meteorologic condition during traffic uncontrolled. The results indicate that the aerosol mass concentration was falling, and the height of air pollution mass changed thin. All these proved that the program of traffic controlled improved the quality of city air. The experiment provide scientific groundwork and reference to the study of the air pollution.

Key words lidar; aerosol; planetary boundary layer; aerosol mass concentration

1 引 言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的直径在 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 的液体或固体微粒颗粒系^[1], 是大气环境中组成复杂、危害较大的污染物之一。大气气溶胶质粒主要来自地球表面, 通过自然和人为机制直接进入大气, 也可以通过化学和光化学反应, 急剧向固体微粒转化产生光化学烟雾, 并进而生成城市气溶胶。气溶胶主要集中在大气边界层内, 所谓大气

边界层通常是直接受地面影响的那部分对流层, 它响应地面作用的时间尺度为 1 小时或更短^[2]。大气边界层层顶就如同一个反射面, 气溶胶进入大气后被抑制在边界层里, 使该层大气污染更加严重。近年来, 随着经济的发展、城市规模的不断扩大, 人为造成的城市大气污染越演越烈, 大气环境质量问题引起了全社会前所未有的关注。因此, 对城市边界层内气溶胶进行立体监测将为空气质量治理提供

收稿日期: 2008-02-29; **收到修改稿日期:** 2008-08-26

基金项目: 中国科学院知识工程重大项目(073H3a1201)资助项目。

作者简介: 董云升(1983—), 男, 博士研究生, 从事激光技术和激光雷达等方面的研究。E-mail: ysdong@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型环境监测仪器、有害痕量气体光学与光谱学监测技术、环境监测仪器的研制与研究等工作。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

可靠的科学依据。

2007年8月17日至20日北京市机动车控制预演方案实施,实行机动车单双号行驶,以评估该方案对北京市空气质量改善的影响,探索大气污染控制的有效措施,并为新的措施提供科学依据,为奥运会期间的空气质量保障提供经验。控制期间,每天大约停驶120万辆小汽车,占300万汽车保有量的40%。为此,针对北京市的空气质量 and 交通主干道(北四环)排放于2007年7月底开展了监测实验,微脉冲激光雷达是参与本次实验的仪器之一,其具有高灵敏度、高分辨率、大范围立体监测以及实时在线、快速动态、可遥测等特点和优势,是气溶胶立体监测的主要工具之一,是环境监测技术的发展和主流技术^[3]。

实验期间,8月16日和21日的气象条件与限车期间较为一致,本文针对16日至21日微脉冲激光雷达监测数据进行分析,探讨了消光系数、边界层以及气溶胶质量浓度时空演变特征,讨论了机动车控制对城市大气污染的影响,为监测机动车排放物对城市大气污染的影响。本实验通过完整的数据积累,为奥运会控制措施的效果评价提供支持,为我国城市大气污染控制提供技术和方法,为城市空气污染治理提供有价值的科学依据和参考。

2 微脉冲激光雷达系统

激光雷达(Lidar)是一种以激光为光源主动式现代光学遥感设备,是传统雷达技术和现代激光技术相结合的产物,是光机电算技术综合应用。图1是本次监测实验所采用的微脉冲激光雷达(MPL)激光雷达结构图^[4,5],详细参数如表1所示。系统主要

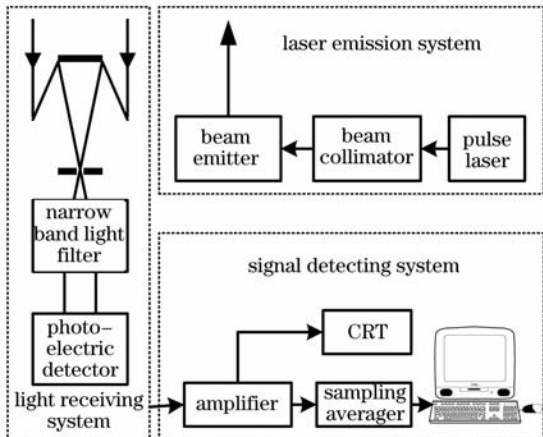


图1 MPL系统体的原理图

Fig. 1 Schematic of the MPL system

由激光发射单元、光学接收单元、信号采集系统四个部分组成。

表1 MPL激光雷达系统参数

Tab 1 Specification of the MPL lidar system

System parameters	Value
Nd : YLF Wavelength /nm	523.5
Output energy / μ J	10
Max repetition rate /Hz	2500
Pulse duration /ns	10
Beam divergence / μ rad	50
Receiving system	Cassegrain
Receiving diameter Φ /mm	200
Field of receiver view / μ rad	100
Detector	APD
Quantum efficiency	50%
Spatial resolution /m	30,75,150
Filter bandwidth /nm	0.1
Data transfer	PC-DIO-24 I/O

激光发射系统包括脉冲激光器、光束准直器和光束发射器。激光器采用二极管抽运的Nd : YLF激光器,性能优越,操作简便,这使得微脉冲激光雷达体积小,重量轻,仅50 kg,这给外场实验带来了很大的便利;系统采用523.5 nm波长的激光作为探测波长,其单脉冲能量约10 μ J,可以防止激光灼伤人眼,有利于人眼安全;此外高达2500 Hz激光脉冲重复频率,提高系统探测的信噪比,消除低频噪音;激光经过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,后相散射信号被光学接收部分接收采集。光学接收系统由发射式卡塞格林望远镜、窄带滤光片和光电探测器组成。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,为了有效地抑制白天探测时的天空背景噪声,系统使用带宽0.1 nm窄带滤光片;信号光准直透镜后由光电倍增器进行信号探测,光电探测器采用雪崩光电二极管。信号采集系统包括前置放大器、采样平均器及计算机,数据采集为光子计数方式,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。

本微脉冲激光雷达一个突出的特点是:实现了全天(无雨时)立体监测。在计算机设定好MPL的系统工作参数后,在无人看护的情况下,可以连续地对大气进行探测,计算机存储光子计数器采集的数据,并实时显示激光大气回波的时空分布。一般在晴空夜晚,微脉冲激光雷达的探测高度可达15 km;白天因为天空背景噪声太强(通常比夜晚要大三个量级),虽然微脉冲激光雷达采用了小接收视场、超窄带滤光片等多项技术来抑制天空背景噪

声,但探测高度仍有所降低,为 6 km 左右。

3 数据处理方法

实验使用 Fernald 算法^[6, 7]对监测数据进行反演处理, Fernald 算法是将空气分子和气溶胶粒子的消光分别考虑来求解激光雷达方程,是激光雷达

方程各种反演方法中具有代表性的一种方法。假设某一高度 z_c 的气溶胶后向散射比边界值 $R(z_c) = \{[\beta_a(z_c) + \beta_m(z_c)] / \beta_m(z_c)\}$ 已知,即 z_c 高度处的气溶胶后向散射系数消光系数 $\alpha_a(z_c)$ 为已知,则求得气溶胶消光系数的后向积分解和前向积分解分别为

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

$$\text{前向积分解 } \alpha_a(z) = -S\alpha_m(z) + \frac{X(z) \cdot \exp[-2(S-1) \int_{z_c}^z \alpha_m(z) dz]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + S\alpha_m(z_c)} - 2 \int_{z_c}^z X(z) \exp[-2(S-1) \int_{z_c}^z \alpha_m(z') dz'] dz} \quad (2)$$

式中 $\alpha_a(z)$ 为距离 z 处大气气溶胶的消光系数 (km^{-1}); $\alpha_m(z)$ 为距离 z 处空气分子的消光系数 (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, $S_m = 8\pi / 3 s_r$ 。 z_c 为标定点高度, $\alpha_a(z_c)$ 和 $\alpha_m(z_c)$ 分别为标定点上的气溶胶和大气分子的消光系数。标定点高度 z_c , 可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 $R(z_c) = [\beta_a(z_c) + \beta_m(z_c)] / \beta_m(z_c) = 1.01$ 。由激光雷达的探测能力以及对流层和大气边界层气溶胶分布的一般特性, 根据不同的探测对象和探测地点, 一般在 3.5~6 km (白天) 或 6~10 km (夜间) 高度范围内进行迭代计算选取。

激光雷达在气溶胶消光系数反演方面, 算法已经非常成熟。然而, 在气溶胶质量浓度空间垂直分布方面仍是讨论的热点问题, 其主要原因是气溶胶的垂直分布受到各种因素的影响, 且这些影响又很难精确描述。根据近年来对近地面气溶胶消光系数与近地面气溶胶质量浓度 m 之间相互关系的研

究^[8-9], 总结如下的经验公式

$$m(z) = a\alpha(z)^b + C \quad (3)$$

其中 a, b 是模型参数, 与季节以及气象条件有关, C 为常数。上式表明近地面气溶胶的质量浓度与消光系数是指数关系。实验中, 使用震荡天平获取同一地点对应时刻的近地面层的质量浓度值, 通过迭代法计算模型的参数, 确定模型参数及常数 C 。

4 观测结果及数据分析

表 2 为 2007 年 8 月 16 日至 21 日气象参数, 期间气象条件稳定, 地面均处于弱高压控制, 风速小, 温湿度高, 不利于污染物扩散。因此, 选取限车前后两天 (2007 年 8 月 16 日与 20 日) 与限车时间段的数据进行对比较, 以监测机动车限行措施对北京市空气质量改善的影响, 探索大气污染控制的有效方法。

4.1 消光系数及边界层数据分析

根据上文中讨论的算法和微脉冲激光雷达在 2007 年 8 月 16 日至 21 日期间的测量数据, 反演了消光系数时空分布, 如图 2 所示。从图上可以看出, 消光系数呈现日周期性变化, 最大值出现在午后 13:00~14:00 时间段, 最小值在夜间 23:00 左右。变化的原因可能与监测地点的位置有关, 监测地点为遥感超级站, 距八达岭高速公路直线距离 1.3 km, 距北四环中路为 1.9 km, 距北五环中路 2.0 km, 监测区域下半夜至次日上午处于交通高峰

期,经过大气对流输送,颗粒物在午后达到最高,后经过扩散和沉降后,浓度逐渐降低。总体趋势上,17日(限车第一天)近地面消光系数和与16日(未限车)相当,下降不明显;18日污染层厚度降低与消光系数下降不明显,19日近地面层消光系数继续下降,污染层厚度显著减小,二者在20日均达

到最低。图3是2007年8月16日至21日微脉冲雷达监测到的边界层数据。呈现有规则日变化,大气边界层的平均高度在1.7 km左右,夜晚边界层高度下降到1.4 km以下,总体上北京地区基本处于鞍形场控制,形势稳定少动,边界层总体上变化不大。

表2 2007年8月16日至21日气象参数

Table 2 The meteorologic parameter on 16-24 August 2007

Date	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Pressure / (hPa)	Wind Speed / (km/h)	Visibility / (km)	Average humidity / $\%$
2007-08-16	26	998	3	3.9	78
2007-08-17	28	997	9	2.8	81
2007-08-18	28	996	11	10.4	80
2007-08-19	28	1000	9	24	69
2007-08-20	28	1002	9	22	70
2007-08-21	27	1004	8	5.1	71
2007-08-22	26	1005	8	7.1	79

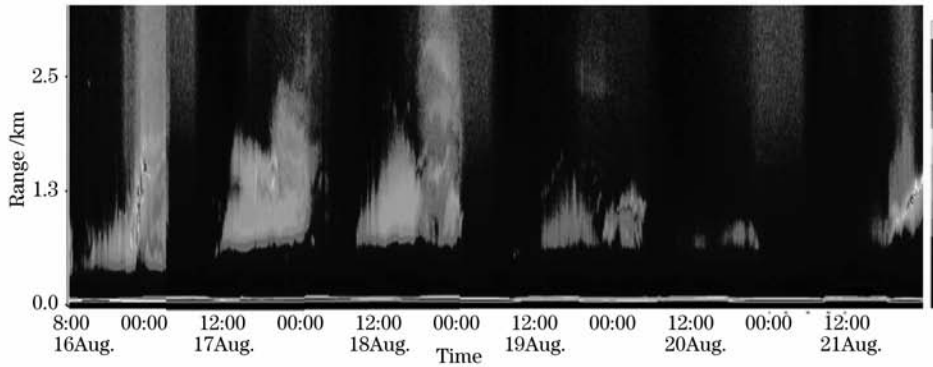


图2 限车前后消光系数时空分布

Fig. 2 The extinction coefficient space-time distribution during traffic controlled

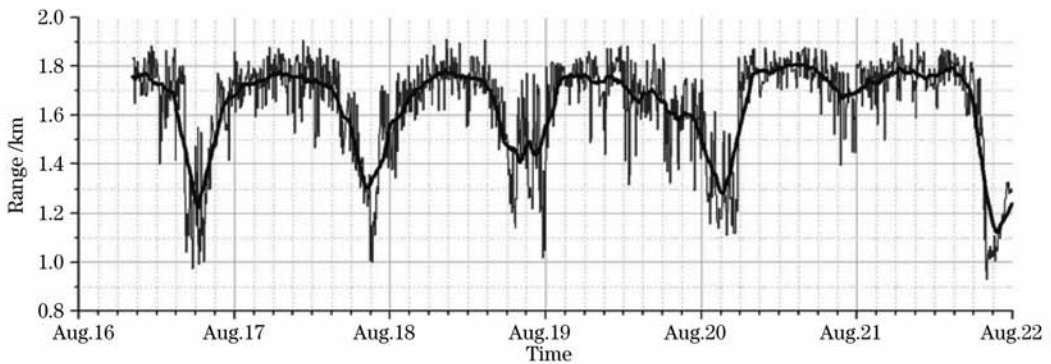


图3 限车前后边界层高度

Fig. 3 The heights of PBL during traffic controlled

4.2 质量浓度数据分析

根据(3)式,对限车期间及限车前后气溶胶质量浓度时空分布进行反演,结果如图4所示。颗粒物浓度空间分布有着明显的日变化过程,白天,大气的对流作用给污染层注入大量颗粒物,到了晚

间,这种污染随着大气扩散作用的影响而逐渐变小。限车期间,17日污染物质量浓度高于16日,污染层比16日厚。18日与19日污染层降低,气溶胶质量浓度减轻,二者在20日均到达最低。在限车期间气溶胶质量浓度总体上呈现逐渐下降的趋

势,限车结束后 21 日气溶胶质量浓度又逐渐上升。说明限车对颗粒物的排放的减小有积极的作用,该观测结果与其他仪器观测结果一致。

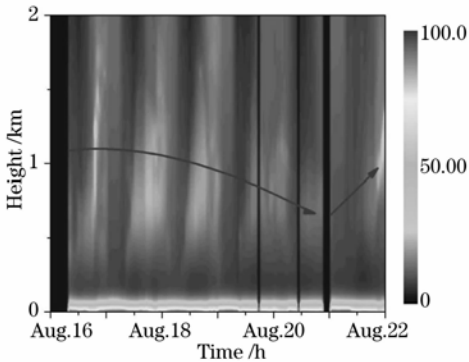


图 4 限车前后气溶胶质量浓度时空分布

Fig. 4 The Aerosol mass concentration space-time distribution during traffic controlled

为确认气溶胶质量浓度时空分布反演算法的稳定性和可信度,将测得的近地面气溶胶质量浓度数据与 PM10 数据进行了对比。图 5 是 8 月 16 日至 8 月 20 日微脉冲激光雷达监测近地面气溶胶质量浓度与 BC 监测质量浓度的对比。两者的相关性为 72%。结果表明使用激光雷达对近地面层气溶胶质量浓度监测具有一定可行性,能够实时正确地反应气溶胶质量浓度变化,为城市污染程度测评提供参考。

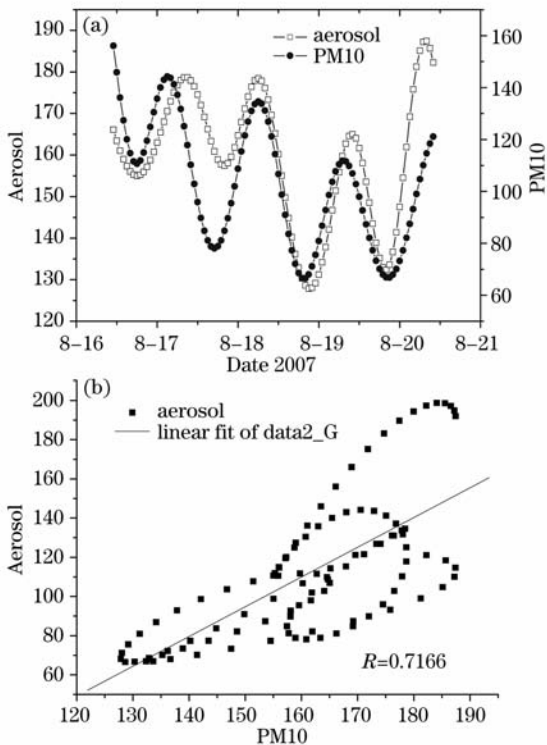


图 5 相关性分析

Fig. 5 The analysis of correlation

5 结 论

针对“2007 年 8 月 17 至 20 日北京市机动车控制预演——单双号行驶”开展了本次实验,使用微脉冲激光雷达对北京市区近地面层大气气溶胶光学特性进行了立体监测,其中 8 月 16 日至 21 日期间,大气边界层呈现傍晚高度降低,到凌晨以后又逐渐升高的日周期变化,限车前后未出现明显差异;与大气边界层变化不同的是:消光系数以及近地面层空气质量浓度呈现日周期变化,但总体上近地面层消光系数和气溶胶质量浓度在限车期间逐渐下降,20 日出现最低值;随着机动车限行减排结束,21 日的近地面层消光系数以及质量浓度呈回升趋势。可见,对机动车限行减排有利于减轻近地面层大气污染,是控制城市大气污染的有效措施之一。微脉冲激光雷达在无人值守的情况下实现了全天候立体监测,为奥运会控制措施的效果评价提供支持。同时,完整数据也将为我国城市空气污染治理提供有价值的科学依据和参考。

参 考 文 献

- 1 W. C. Hinds. Aerosol thchnology [M]. Sun Yufeng transl., Heilongjiang, Heilongjiang Science and Technology Press, 1989
W. C. Hinds. 气溶胶技术[M]. 孙聿峰译,黑龙江:黑龙江科学技术出版社,1989
- 2 Roland B. Stull. An introduction to boundary layer meteorology [M]. Yang Changxin Transt. Beijing: China Meteorological Press, 1991, 1~3
Roland B. Stull. 边界层气象学导论[M]. 杨长新译,北京:气象出版社,1991,1~3
- 3 Tao Zongming, Zhang Yinchao, Cen Gang *et al.*. Estimating method of detecting minimum pollutant gas concentration by lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 602~604
陶宗明,张寅超,岑岗等. 激光雷达探测污染气体最小浓度的估算方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 602~604
- 4 J. D. Spinhirne. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**(1): 48~54
- 5 Liu Cheng, Ming Hai, Wang Pei *et al.*. Measurements of the aerosol over naqu of tibet and suburb of Beijing by micro pulse lidar(MPL) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1435~1439
刘诚,明海,王沛等. 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[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1435~1439
- 6 J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 7 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~655
- 8 Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo *et al.*. Aero sol pollutant boundary layer mea sured by lidar at Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 59~73
胡欢陵,吴永华,谢晨波等. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 59~73
- 9 Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~1573
韩道文,刘文清,刘建国等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1567~1573