

文章编号: 0253-2239(2010)02-0315-06

# 激光雷达在城市交通污染中应用研究

董云升 刘文清 刘建国 陆亦怀 韩道文 张天舒 赵雪松 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** 机动车排放造成的城市空气污染是目前亟待解决的问题之一。为了分析机动车排放对北京市大气污染的影响,于 2007 年 8 月在北京市健翔桥附近利用米氏(Mie)散射激光雷达,对交通排放的颗粒物进行了长时间连续立体监测。实验选取 2007 年 8 月 16 日至 21 日机动车限行前后的典型数据进行分析,对激光雷达系统及其数据处理方法进行讨论,反演了近地面层颗粒物质量浓度,与车流量和黑炭浓度进行了比对分析。把机动车限行期间与限行前后的观测数据分析比较,发现颗粒物质量浓度与车流量具有很好的相关性,限行期间颗粒物质量浓度总体上呈现下降趋势,证明了机动车限行减排是一项减轻城市大气污染的有效措施。

**关键词** 激光雷达;大气气溶胶;大气颗粒物;机动车排放;颗粒物质量浓度

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0315

## Application Study of Lidar in Urban Traffic Pollution

Dong Yunsheng Liu Wenqing Liu Jianguo Lu Yihuai Han Daowen

Zhang Tianshu Zhao Xuesong Huang Shuhua

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

**Abstract** At present, one of the urgent problems need to solve is the motor vehicle causes to urban air pollution. In order to analyse the effect of the motor vehicle contribute to the urban air pollution of Beijing, the particulate mass characteristic over Jianxiang bridge was monitored continually with lidar in August of 2007. The representative data which was monitored during Beijing to rehearse olympics traffic control was discussed. The system structure and technical parameters of Mie lidar were presented and the data-processing method was discussed, the particulate mass concentration was retrieved. The particulate mass concentrations with the traffic volume were compared and black carbon (BC) concentrations which were measured in the similar meteorologic condition during traffic uncontrolled. The results indicated that the particulate mass concentration was falling, and there was a good correlation between the particulate mass concentrations and the traffic volume. All these proved that the program of traffic controlled improved the quality of the city air.

**Key words** lidar; atmospheric aerosol; particulate mass; vehicle emission; particulate mass concentration

## 1 引 言

由于经济的发展和人口的不断增加,空气污染形势越来越严峻,可吸入颗粒物已成为北京市空气污染首要污染物<sup>[1~3]</sup>。自 1998 年以来,北京市采取一系列大气污染控制措施,随着对燃煤型污染、工业污染以及扬尘污染的有效控制,机动车尾气排放对可吸入颗粒物的影响越来越大。目前,北京市汽车保有量超过 340 万辆,汽车尾气排放特征及其对大气环境影响具有代表性。本研究选取 2007 年 8 月

17 日至 20 日北京市机动车控制预演方案实施期间,评估机动车限行方案对北京市空气质量改善的影响,探索城市大气污染控制的有效措施。2007 年 8 月 17 日开始实施机动车限行方案,限行方案规定每天 6:00~24:00 为限行时间,在此期间,全市机动车实行单双号行驶,单日单号牌行驶,双日双号牌行驶,个性化号牌按双号管理;公务用车在上述限行基础上再限行 20%,外省车辆、执行任务的警车和救护车、运输鲜活农产品车辆、省际长途客车以及省际

收稿日期: 2009-03-26; 收到修改稿日期: 2009-04-13

基金项目: 中国科学院知识工程重大项目(073H3a1201)资助课题。

作者简介: 董云升(1983—),男,博士研究生,主要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技术方面的研究。

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

旅游车车辆除外<sup>[4]</sup>。这样北京每天将会减少约 131 万辆机动车,占 300 万汽车保有量的 40%。为此,针对北京市的空气质量 and 交通主干线(北四环)排放于 2007 年 7 月底开展了监测实验,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方向和主流技术<sup>[5]</sup>。

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 日激光雷达监测数据进行分析,探讨了消光系数以及颗粒物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。

## 2 激光雷达系统简介

激光雷达是一种以激光为光源的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,是光机电技术的综合应用。图 1 是本发明选用的米氏(Mie)偏振激光雷达的基本结构示意图<sup>[6,7]</sup>。系统主要由激光发射单元、光学接收单元和信号采集系统三个部分组成,详细参数如表 1 所示。

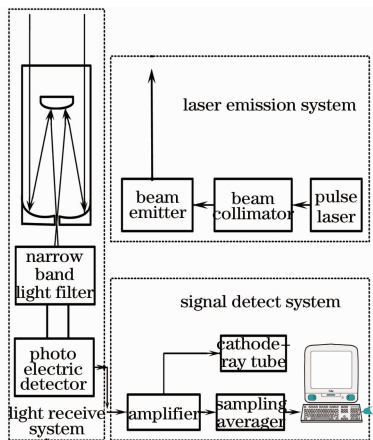


图 1 双通道 Mie 偏振激光雷达原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the dual-channel Mie polarized lidar

激光发射系统包括脉冲激光器、光束准直器和光束发射器三个部分,激光器使用美国 BIG SKY LASER 公司生产的 Ultra 系列激光器,激光器输出探测光波长为 1064 nm 和 532 nm,最高单脉冲能量 45 mJ,发散角 1 mrad,经光束准直器 5 倍扩束后,平行于接收望远镜光轴射出到大气中。激光雷达系统采用离轴式设计,系统存在探测盲区,盲区大小为 100 m。

表 1 双通道扫描偏振激光雷达系统参数

Tab 1 Specification of dual-channel scan polarized lidar

System parameters	value
Nd:YAG wavelength /nm	1064, 532
Output energy /mJ	50, 45
Max repetition rate /Hz	20
Beam divergence /mrad	1
Pulse duration /nm	8
Receiver telescope diameter/mm	230
Field of receiver view /mrad	2
Focal length of receiver /mm	1100
Filter bandwidth /nm	3
Detector	PMT
A/D accuracy /bit	14
A/D sampling rate /MHz	100

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。激光发射单元向探测区域发射 1064 nm 和 532 nm 探测脉冲,被传输路径上的大气气溶胶、颗粒物或云所散射,后向散射光被接收望远镜接收会聚,依次通过小孔光阑与准直系统,经分光镜后分为波长为 1064 nm 和 532 nm 两束信号。波长 1064 nm 的信号光被雪崩二极管(APD)接收转化为电信号。波长 532 nm 的信号光通过检偏棱镜被分为两束线偏光,被相应的光电倍增管(PMT)接收转换为相应的电信号。为了有效地抑制白天探测时的天空背景噪声,提高信噪比,分别在探测器前安装了超窄带高透射率的滤光片。

信号采集系统包括前置放大器、采样平均器及计算机,APD 与 PMT 采集到电信号经放大、滤波、平均后,由计算机进行处理,并实时显示数据结果。

实验中使用的 Mie 偏振激光雷达突出的特点是: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,计算机自动储存分析采集的数据,并实时显示激光大气消光系数时空分布。

## 3 数据处理方法

实验使用斜率法<sup>[8,9]</sup>对监测数据进行反演处理。通常,假设大气在水平方向上是均匀的,因此水平方向上的 Mie 散射激光雷达方程可写为

$$P(R) = KR^{-2}\beta\exp(-2\delta_H R), \quad (1)$$

式中  $P(R)$  是激光雷达接收的大气后向散射光的回波功率(W); $K$  是激光雷达系统常数( $W \cdot km^3 \cdot sr$ ); $R$  是距离(m); $\beta$  是大气水平后向散射系数( $km^{-1} \cdot sr^{-1}$ ); $\delta_H$  是大气水平消光系数( $km^{-1}$ )。对(1)式两边取对数并对  $R$  求导得出

$$\frac{d\{\ln[P(R)R^2]\}}{dR} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dR} - 2\delta_H. \quad (2)$$

由于已假定大气水平均匀,故  $d\beta/dR = 0$ 。因此,对  $\ln[P(R)R^2]$  和  $R$  进行最小二乘法线性拟合,拟合直线斜率的一半则是大气水平消光系数  $\delta_H$ ,如(3)式所示,它包含来自大气中气溶胶粒子和空气分子的共同贡献。

$$\delta_H = -\frac{1}{2} \frac{d\{\ln[P(R)R^2]\}}{dR}. \quad (3)$$

通过上述方法获取了地面颗粒物消光系数,为了进一步获取地面颗粒物质量浓度,使用了颗粒物消光系数和质量浓度之间模型。根据近年来大家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<sup>[10,11]</sup>,总结出如下的经验公式

$$m(z) = a \alpha(z)^b + C, \quad (4)$$

式中  $a, b$  是模型参数,与季节以及气象条件有关; $C$  为常数; $z$  为距离变量。(4) 式表明近地面颗粒物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  $C$ 。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大家讨论的热点问题,其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。

综上所述,为了获取近地面层大气消光系数,首先获取地面的气溶胶消光系数值和同一地点对应时刻的质量浓度值。气溶胶消光系数由激光雷达监测得到,质量浓度可由多种方法测量<sup>[12]</sup>,例如滤膜采样称重,振荡天平测量等。然后把相同条件下的消光系数与质量浓度对放在一起,通过迭代法计算模型的参数。计算的模型参数包括线性模型的  $a, b$  和  $C$ 。实验迭代计算模型参数值为  $a = 289.3, b = 0.93, C = -17$ 。

## 4 观测结果及分析

实验地点位于北京市健翔桥附近的北京信息科技大学的图书馆内(39°59′13″N, 116°22′29″E),如图2所示,健翔桥地处北四环路和八达岭高速公路交汇处,车流量大、交通压力繁重。该处是机动车排放对城市大气污染的典型案例,根据实验需要,在此处布置了包括激光雷达、PM10、长光程差分光学吸收

光谱仪(DOAS)、振荡天平颗粒物监测仪(TEOM)等环境监测仪器进行实验。为测量交通干道上的颗粒物质量浓度,激光雷达被水平放置,进行近似水平方向探测,时间分辨率设置为 15 min,每个周期工作 5 min 发射 3000 发脉冲,休息 10 min,完成一组数据采集。雷达的距离分辨率为 3 m。由于道路两边都是建筑物,激光雷达摆放位置受到较大局限。实际摆放时都不是严格水平放置,为了得到道路汽车排放的信息,数据分析时只取 1000 m 有限距离的数据进行分析。

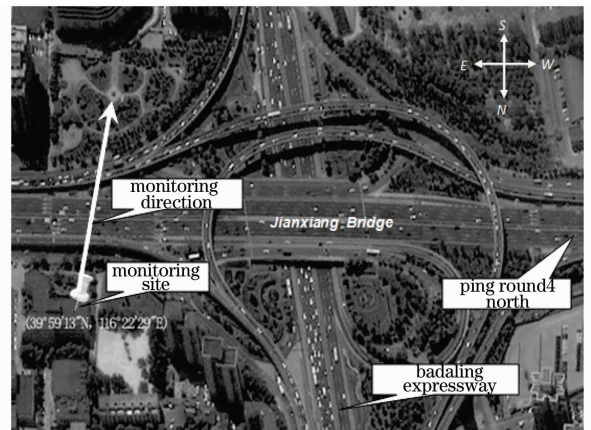


图2 实验监测点周边环境

Fig. 2 Ambient environment of the experimental monitoring site

### 4.1 气象条件分析

表2为2007年8月16日至21日“限车时段”的气象参数,该期间北京天气形势较稳定,处于85 kPa的高压场控制,地面风向以偏南风为主,18日风向由东南风转变到西南风,四天的风速日均值较小。

8月18日北京85 kPa气压场和风场分析,北京处于高压控制,并且方向以西南风为主,同时有来自渤海海域的气流输送,与之相匹配的地面风场,也是偏南风为主,风力较小,北京这四天天气形势稳定,和18日基本类似。在此天气形势控制下,污染物不利于扩散,造成污染物累积。为了评估限车的效果,考虑到天气相似因素,与限车前后的16日和21日污染气象条件较为一致,因此,对于限车前后污染物浓度的比较,采用限车时段(17日至20日)与限车前后两天(8月16日和21日)进行对比。

表 2 2007 年 8 月 16 日至 21 日气象参数

Table 2 Meteorologic parameter on 16~21 Aug. 2007

Date	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Pressure /kPa	Wind speed / $(\text{km}/\text{h})$	Visibility /km	Average humidity /%
2007-7-16	26	99.8	3	3.9	78
2007-7-17	28	99.7	9	2.8	81
2007-7-18	28	99.6	11	10.4	80
2007-7-19	28	100.0	9	24	69
2007-7-20	28	100.2	9	22	70
2007-7-21	27	100.4	8	5.1	71

#### 4.2 激光雷达反演颗粒质量浓度与车流量之间的关系分析

根据上文讨论的算法和米氏散射激光雷达在 2007 年 8 月 16 日至 21 日期间的测量数据(主要使用波长 1064 nm 的探测信号)对消光系数进行分析,进而由颗粒物质量浓度与消光系数的经验公式,对 2007 年 8 月 19 日颗粒物质量浓度进行反演,如图 3 所示。图 4 是 2007 年 8 月 19 日对应的车流量数据,该数据由车流监测雷达测得双向行使车流量数据,车流量雷达时间分辨率为 5 min。从图 3 和图 4 可以看出颗粒物质量浓度和车流量在趋势上有很好的相关性。车流数据显示交通高峰期 7:00~18:00 时,该时间段每 5 min 车流为 450 辆左右,交通压力相当繁重。对应该时间段路面上方颗粒物浓度维持在  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。夜晚 23:00 至次日 5:00,该时间段虽然车流不太多,但该时间允许大货车通行,尤其在凌晨 2:00~5:00 时的时间段,所通行车辆以货车主,所以颗粒物质量浓度也比较高。凌晨 5:00~7:00 时的时间段车流量明显降低,且大卡车所占比例相对 2:00~5:00 时的时间段大为降低,该时间段路面上方颗粒物浓度为该天的最小值。18:00 时左右的交通压力虽然比较大,但气溶胶的质量浓度明显偏低。对比 19 日气象数据发现,如图 7 所示,从 15:00 时开始风速渐渐增大,在 18:00 时风速的时均值最大为  $5.1 \text{ m}/\text{s}$ 。对应于该时间

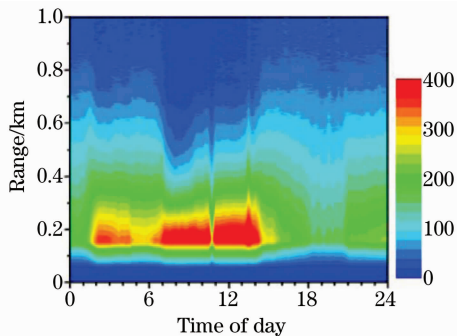


图 3 2007.8.19 颗粒物质量浓度日变化

Fig. 3 Date change of the mass concentration on 19 Aug. 2007

段的能见度也达到全天最高值,约为 7 km。由于持续大气作用,颗粒物得到扩散,颗粒物质量浓度呈现低值。

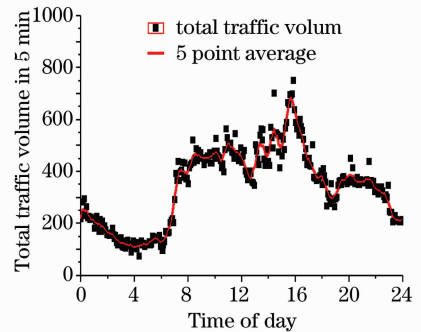


图 4 2007.8.19 日车流量

Fig. 4 Date traffic volume on 19 Aug. 2007

图 5 和图 6 分别为 2007 年 8 月 15 日 00:00 至 2007 年 8 月 21 日 12:00 颗粒物质量浓度和车流量,总体上颗粒物质量浓度随车流量变化而发生改变。从图 6 的车流量监测数据看,车流最大值一般出现在上午 8:00 左右,最小值出现在凌晨 2:00 左右,颗粒物质量浓度也在对应时间段出现极值,二者在变化趋势上具有很好的相关性。与限行前后相比较,机动车限行期间车流量略有下降,在 8 月 18 日小幅下降,8 月 19 日为限行期间的最小值,约为 9000 辆,与之对应的道路上方颗粒物质量浓度由机动车限行前(16 日)的  $840 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  下降至限行

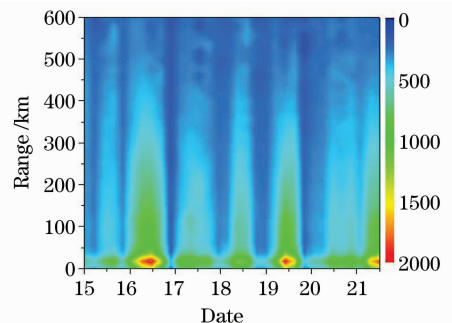


图 5 2007.8.15~2007.8.21 颗粒物质量浓度变化

Fig. 5 Change of the mass concentration during 15 Aug. 2007~21 Aug. 2007



期间的  $750\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  左右, 机动车限行使得颗粒物质量浓度下降约为  $90\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。机动车限行在一定程度上减轻了交通污染。

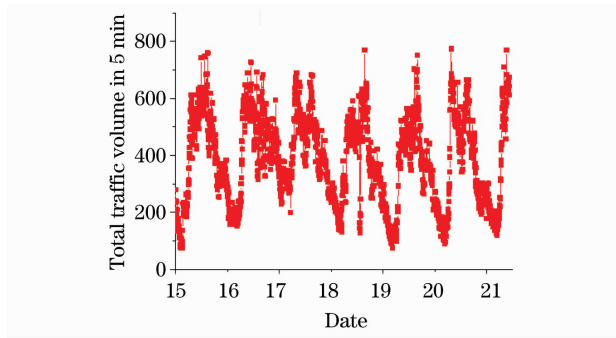


图 6 2007. 8. 15~2007. 8. 21 车流量

Fig. 6 Date traffic volume during 15 Aug. 2007~21 Aug. 2007

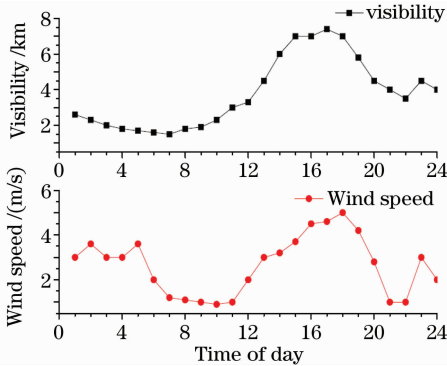


图 7 2007. 8. 19 能见度与风速日变化

Fig. 7 Date change of the visibility and wind speed on 19 Aug. 2007

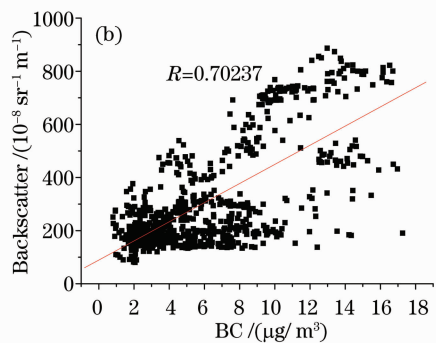
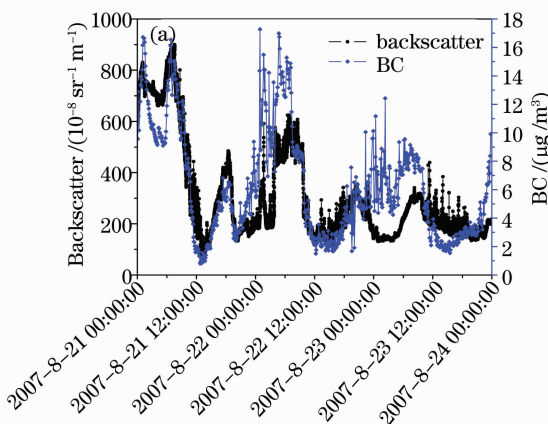


图 9 相关性分析

Fig. 9 Analysis of correlation

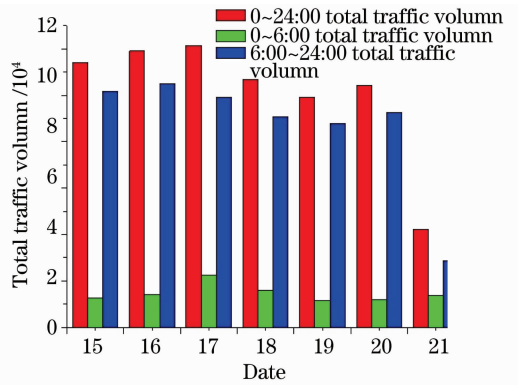


图 8 2007. 8. 15~2007. 8. 21 车流量日变化

Fig. 8 Date change of the traffic volume during 15 Aug. 2007~21 Aug. 2007

### 4.3 激光雷达反演颗粒质量浓度与 BC 间的对比分析

为了确认颗粒物质量浓度时空分布反演算法的稳定性和可信度, 将测得的近地面颗粒物质量浓度数据与该时间段测得的 BC 进行比较, 结果如图 9 所示。图中 8 月 16 日至 8 月 20 日微脉冲激光雷达监测近地面颗粒物质量浓度与 BC 监测质量浓度的对比。两者的相关性为 70%。表明激光雷达测量的颗粒物中, BC 所占的比例很高, 机动车道 BC 主要是汽车产生的。证明使用激光雷达对交通排放进行立体监测, 对汽车尾气排放特征进行研究具有一定可行性, 能够实时正确地反应机动车排放情况, 为城市污染程度测评提供参考。

## 5 结 论

2007 年 8 月, 针对“2007 年 8 月 17 至 20 日北京市机动车控制预演——单双号行使”开展了本次实验研究, 实验布设了大量的仪器。其中, 在健翔桥

( $39^{\circ}59'13''\text{N}$ ,  $116^{\circ}22'29''\text{E}$ ) 布设了 Mie 散射激光雷达、长光程 DOAS 和炭黑监测仪等仪器对机动车排放进行监测, 通过与车流量等仪器的监测数据分析对比, 发现路面颗粒物质量浓度随车流量变化而变

化,二者在趋势上具有很好的相关性。在机动车限行期间,单日车流量下降约 18000 辆,与之对应,颗粒物质量浓度也由机动车限行前(16 日)的  $840 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  下降至限行期间的  $750 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  左右,机动车限行使得颗粒物质量浓度下降约为  $90 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,机动车限行在一定程度上减轻了交通造成的城市污染。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Pan Zhi, Liu Hongjie *et al.*. Characteristics of size distribution of particles from traffic sources and their relations with visibility[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, **14**(4): 17~22  
王 玮,潘 志,刘红杰等.交通来源颗粒物粒径谱分布及其与能见度关系[J].环境科学研究,2001, **14**(4): 17~22
- 2 Yu Guoguang, Wang Tieguan, Wu Dapeng *et al.*. Organic compound containing oxygen in aerosol of Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **30**(8): 29~35  
于国光,王铁冠,吴大鹏等.北京市大气气溶胶中含氧有机化合物的研究[J].环境科学与技术,2007, **30**(8): 29~35
- 3 He Qiang, Jing Wenyong, Wang Xuting. Introduction to Environmentology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. 184~198  
何 强,井文涌,王翔亭.环境学导论[M].北京:清华大学出版社,1994. 184~198
- 4 [http://www.chinaorg.cn/idx/yw/2007-08/14/content\\_5114359.htm](http://www.chinaorg.cn/idx/yw/2007-08/14/content_5114359.htm)
- 5 Tao Zongming, Zhang Yanchao, 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
- 6 J. D. Spinhirne. Micro pulse lidar[J]. *IEEE T. Geosci. Remote Sensing*, 1993, **31**(1): 48~54
- 7 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间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
- 8 J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 211~220
- 9 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 Differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 597~601  
胡顺星,胡欢陵,吴永华等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J].光学学报,2004, **24**(5): 597~601
- 10 Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo *et al.*. Aero sol pollutant boundary layer measured 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
- 11 Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. *Chinese J. 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
- 12 Liu Changsheng, Liu Yongbao. The Atmospheric Radiology [M]. Nangjing: Nanjing University Press, 1990. 120~137  
刘长盛,刘永保.大气辐射学[M].南京:南京大学出版社,1990. 120~137