

文章编号: 1001-3806(2009)02-0130-04

## 机动车颗粒物的激光雷达监测

张春光, 张玉钧\*, 韩道文, 刘文清, 陈臻懿

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 为了用激光雷达遥测机动车排放颗粒物的浓度分布, 从理论上分析了颗粒物后向散射系数和质量浓度之间的关系; 利用激光雷达测量的后向散射系数以及黑碳仪测量的黑碳气溶胶质量浓度数据, 采用最小二乘法对颗粒物后向散射系数与浓度以及后向散射系数与车流量之间进行了相关性分析。结果表明, 激光雷达测量的后向散射系数能够很好地反演机动车颗粒物质量浓度, 它们之间存在正比关系。激光雷达探测的气溶胶颗粒物浓度和车流量具有很好的致性, 可以用来研究机动车排放颗粒物的水平分布和扩散特性; 这对于机动车的管理以及大气污染控制具有重要意义。

**关键词:** 激光技术; 激光雷达; 最小二乘法; 后向散射系数; 气溶胶质量浓度; 车流量

**中图分类号:** X831 **文献标识码:** A

### Monitoring for the particles emitted by vehicles with lidar

ZHANG Chun-guang, ZHANG Yu-jun, HAN Dao-wen, LIU Wen-qing, CHEN Zhen-yi

(Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to retrieve the particles emitted by vehicles with lidar. Firstly, the relation between backscattering coefficient and mass concentration was studied in theory. Then based on the backscattering coefficient measured with lidar and aerosol mass concentration measured with aethalometer, the correlation between them and the correlation between the backscattering coefficient and vehicle flow are analyzed. Conclusions are drawn: it's possible to inverse the backscattering coefficient into the mass concentration because of their linear relation. The horizontal distribution and scattering characteristics of the particles emitted by vehicles can be studied because the aerosol mass concentration is consistent with the vehicle flow. The results are useful for vehicles management and air pollution control.

**Key words:** laser technique; lidar; least square method; backscattering coefficient; aerosol mass concentration; traffic flow

### 引言

大气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, 其粒径范围一般为  $0.001\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 。大气气溶胶是观测城市对流层空气质量的天然载体<sup>[1]</sup>, 是衡量大气环境质量的一个重要指标。悬浮在大气中的气溶胶粒子还会直接影响到地-气系统的能量收支<sup>[2]</sup>, 进而影响气候变化, 而且会污染人类的生存环境, 进而直接危害人体健康。因此, 探测城市大气中污染源的时间、空间分布特征<sup>[3,4]</sup>, 以及风速风向、温度、湿度和湍流场的规律, 更深入地了

解气溶胶的扩散、沉降、稀释等大气物理、化学过程具有重要的意义。

目前, 空气污染问题已经成为城市环境问题的首要问题, 颗粒物是影响城市空气质量的主要污染物, 全国只有 66.5% 的城市颗粒物年均浓度达到或优于 2 级标准。城市污染日趋严重, 其中机动车排放的污染物是城市污染的重要部分。机动车辆带来的污染已成为北京、上海和广州等城市空气污染中最主要的污染源之一, 对于机动车排放颗粒物的监测迫在眉睫。

激光雷达是大气气溶胶探测强有力的工具。数十年来, 激光技术、信号探测和数据采集及其控制技术的发展和激光雷达在对流层气溶胶的探测高度、垂直跨度、空间分辨率、时间上的连续监测、测量精度等方面具有全面的优势, 是其它探测手段很难比拟的<sup>[5,6]</sup>。利用激光雷达测量的气溶胶后向散射系数来研究机动车排放颗粒物质量浓度的变化, 是激光雷达遥感探测的一个拓展, 能够为机动车辆的管理控制以及大气环境治理提供科学依据。

基金项目: 中国气象局新技术推广基金资助项目 (GYHY200706023)

作者简介: 张春光 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事测云激光雷达的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yjzhang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2008-01-07; 收到修改稿日期: 2008-03-05

## 1 激光雷达探测颗粒物原理

### 1.1 米散射激光雷达方程

激光雷达遥感大气是基于激光辐射与大气分子和气溶胶粒子之间的相互作用产生的各种物理过程的遥感探测技术。激光雷达的发射系统发出的光遇到气溶胶颗粒物发生相互作用,穿过大气的光强度减弱,散射光的强弱与总散射截面成正比(散射截面越大,散射越强;反之,散射就越弱)。激光雷达的探测系统接收到后向散射回波信号,利用合适的反演方法从后向散射回波信号中提取出气溶胶颗粒物的后向散射系数和消光系数,从而了解颗粒物的光学特性。当气溶胶颗粒物浓度升高时,气溶胶颗粒物的总散射截面增大,散射光增强,通过测量散射光的强弱,即可得到气溶胶颗粒物的相关信息。理论研究指出<sup>[7]</sup>,在不相关的单散射条件下,散射光信号与颗粒物的大小和数量有关,这就为它们之间关系的确定提供了一个尺度和依据。

通常在只考虑1次散射的情况下,米散射激光雷达方程可以表示为:

$$P(z)z^2 = K\beta(z)\tau^2(z) \quad (1)$$

式中, $P(z)$ (单位为W)是激光雷达探测到的距离 $z$ (单位为km)处的大气后向散射回波功率, $\beta(z)$ 和 $\tau(z)$ 分别表示距离 $z$ 处的后向散射系数和大气透过率, $K$ 是激光雷达常数(单位为 $W \cdot km^3 \cdot sr$ )。

有资料表明<sup>[8]</sup>,当气象光学距离超过10km时, $\tau^2$ 总是大于0.83,可以近似认为 $\tau^2 = 1$ 。气溶胶后向散射系数可以近似表示为:

$$\beta(z) = P(z)z^2/K \quad (2)$$

### 1.2 气溶胶颗粒物后向散射系数与质量浓度之间的关系

根据Mie散射理论,只要气溶胶的复折射率和谱分布确定了,那么气溶胶的后向散射系数就可以通过下面的公式计算得到<sup>[9]</sup>:

$$\beta = \int_{r_1}^{r_2} Q_s(\pi) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad (3)$$

式中, $r$ 表示气溶胶粒子半径, $r_1 \sim r_2$ 是粒子的公布范围; $N(r)$ 表示半径为 $r$ 的粒子数,散射效率因子 $Q_s(\pi)$ 可以由Mie理论精确计算得到。

对于Junge谱:

$$\frac{dN(r)}{dr} = cr^{-(v+1)}, (r \leq 1 \mu m) \quad (4)$$

对于Diermendjian谱分布:

$$\frac{dN(r)}{dr} = ar^b \exp(-cr^d), (r > 1 \mu m) \quad (5)$$

式中, $a, b, c, d, v$ 是拟合系数, $a, c$ 又为谱分布中反映

粒子浓度的常数。

把谱分布代入计算散射系数的公式中,得:

$$\beta = c \int_{r_1}^{r_2} Q_s(\pi) \pi r^2 r^{-(v+1)} dr \quad (6)$$

$$\beta = a \int_{r_1}^{r_2} Q_s(\pi) \pi r^2 r^b \exp(-cr^d) dr \quad (7)$$

在基本谱形不变的条件下,积分部分为常数, $a, c$ 同质量浓度的变化规律是呈线性变化关系的。由此推论,后向散射系数同质量浓度的变化也是线性的,用公式可以表示为:

$$m = \gamma\beta \quad (8)$$

式中, $m$ 是质量浓度, $\gamma$ 是比例系数,与气溶胶的尺度谱以及光学折射率有关, $\beta$ 为后向散射系数。SUN等人早在1982年就对激光遥测大气气溶胶质量浓度进行了理论分析<sup>[10]</sup>,指出质量浓度与消光系数之间是呈比例关系的,在水平方向认为气溶胶分布是均匀的,则后向散射系数与消光系数的比值不变,由此得出气溶胶质量浓度与后向散射系数成正比,与上述推导的结论一致。

考虑到测量时的一些不稳定的因素,气溶胶的质量浓度可以表示为:

$$m = \gamma\beta + C \quad (9)$$

式中, $C$ 是常数,与实际测量时的气溶胶组份以及测量仪器有关。这与MUNKEL等<sup>[11]</sup>给出的结论一致。这样,就建立了用后向散射系数来研究气溶胶质量浓度的关系。通常情况下,气溶胶的种类很多,来源广泛,但是在城市的道路交通点附近主要是由车辆排放引起的。通过气溶胶后向散射的变化,就可以反映出其质量浓度的变化,再结合车辆数据进行分析,就可以用激光雷达研究车辆排放颗粒物的特性了。

## 2 实验结果与分析

实验中用的是半导体激光雷达,该半导体激光雷达的激光波长为905nm,处于近红外波段,对人眼安全。激光雷达水平放置在交通主干道附近,用来监测机动车排放颗粒物的水平分布与扩散。黑碳(black carbon, BC)是一种重要的气溶胶,是机动车排放的主要颗粒物。实验时用放置在路边的黑碳仪探测机动车排放的黑碳气溶胶质量浓度。

为了验证激光雷达后向散射系数反映机动车排放颗粒物浓度的可行性,对后向散射系数和黑碳气溶胶质量浓度进行了相关性分析。由于激光雷达每15s给出1组后向散射数据,距离分辨率为10m,黑碳仪每5min给出1组数据。所以,对雷达数据在时间上进行平均,在道路宽度范围内进行距离平均,然后与黑碳气溶胶质量浓度进行最小二乘法线性拟合。图1是后向散射系数与黑碳气溶胶质量浓度随时间变化的趋势图,横坐标表示时间,纵坐标表示后向散射系数和黑碳

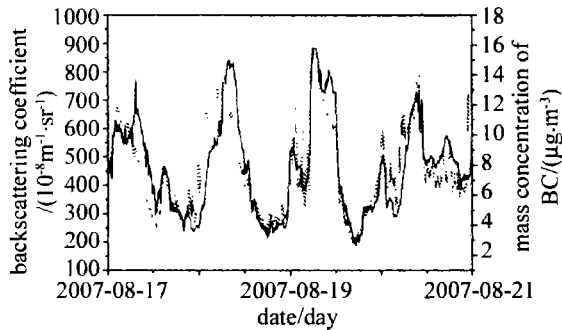


Fig. 1 Backscattering coefficients varying with BC's mass concentration 质量浓度。从图中可以看出,从凌晨开始气溶胶浓度开始上升,上午达到一天中的最大值,随后开始减小,中间存在一些小的波动,总体来说与后向散射系数的变化趋势非常吻合。为了定量研究它们之间变化趋势吻合的程度,对它们进行了相关性分析,见图2。可以

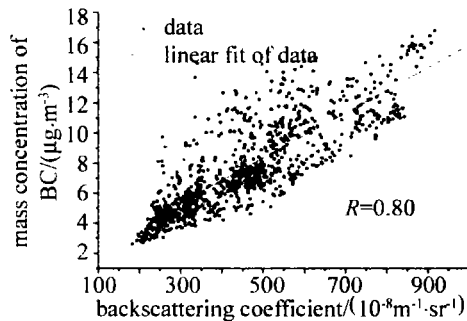


Fig. 2 Correlation between backscattering coefficients and concentration of BC

看出,激光雷达测量的后向散射系数与黑碳气溶胶的质量浓度有较好的相关性,相关系数  $R$  达到了 0.80,说明在城市交通点的气溶胶成分中,细粒子占有较大的质量比重,主要由机动车排放及 2 次污染产生,对后向散射贡献很大。

具体的反演方程为:

$$A = (0.93374 + 0.01488 \cdot B) (\mu\text{g} \cdot \text{m}^3) \quad (10)$$

式中,  $A$  为激光雷达所测黑碳质量浓度,  $B$  为激光雷达所测后向散射系数。为了验证一下这种方法反演黑碳质量浓度结果的准确性,利用上述方程拟合了黑碳气溶胶的质量浓度,并与黑碳仪测量的结果进行了对比。如图 3 所示,两种方法测量的结果非常的吻合,相关性分析见图 4,相关系数  $R$  达到 0.85,相关性有所改进,不是很明显,可能与气象以及气溶胶变化等因素有关。总的来说,利用激光雷达后向散射系数反演黑碳气溶胶质量浓度这种方法是可行的,能够实时地反映出气溶胶质量浓度的变化。

由于主要关心的是交通主干道上机动车排放颗粒物的信息,所以要结合车流量数据进行分析。微普微波车流量检测雷达(微普雷达,MP radar,MPR)安装在与激光雷达不远的路边,能够给出道路上车流量的数据。车流量用每 5min 的数据,选取气象条件比较稳定

的时间段进行分析,后向散射系数与车流量的变化

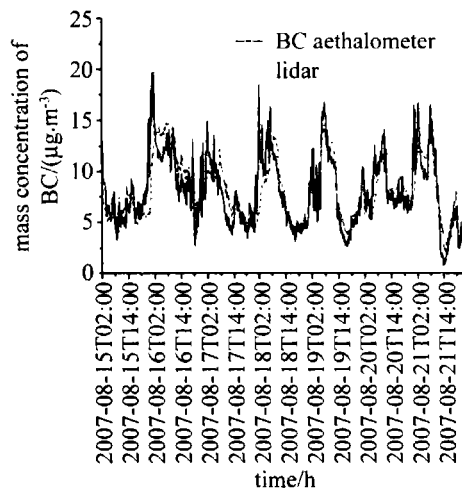


Fig. 3 BC's mass concentration by Lidar and BC Aethalometer

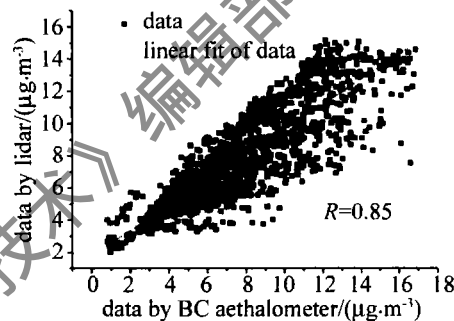


Fig. 4 Correlation between the data measured with lidar and BC aethalometer

见图 5,车流量和后向散射系数都是在上午 9 点左右

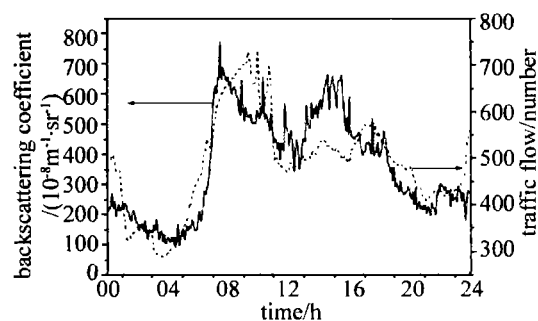


Fig. 5 Backscattering coefficients and traffic flow

出现峰值,下午 6 点左右出现峰值,而下午 3 点左右的峰值可能与大气的波动有关,总体变化趋势比较一致,图 6 是它们的相关性分析,相关性达到了 0.77,表明

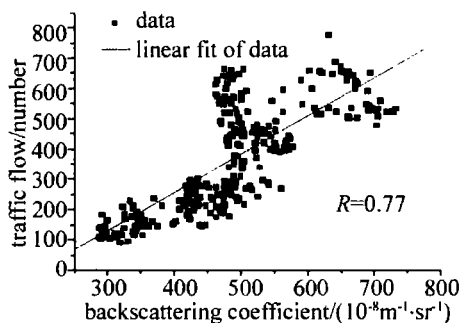


Fig. 6 Correlation between traffic flow and backscattering coefficients 在交通道路上以机动车排放颗粒物的散射为主,可以

很好地反映机动车排放颗粒物的浓度,车流量大时,颗粒物浓度高,后向散射变强。

图7是实验中测量的激光雷达后向散射强度和车流量的时间序列图。框图表示后向散射强度的时空分

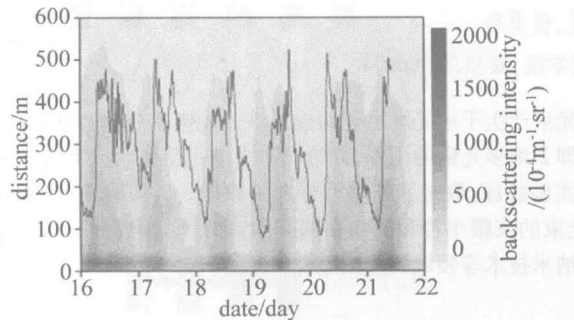


Fig.7 Series of backscattering intensity and traffic flow

布,横坐标表示时间,纵坐标表示距离,曲线表示车流量的变化情况。从图中可以看出:激光雷达测量的气溶胶颗粒物浓度与车流量的变化呈现一定的周期性,具有双峰结构,上午9点左右和下午6点左右达到峰值,与人们的工作时段和边界层变化密切相关。在交通点颗粒物主要是由机动车产生的,颗粒物浓度和车流量变化趋势具有很好的一致性,车流量大的时候,颗粒物浓度大;反之,浓度就小,用激光雷达能够很好地监测机动车颗粒物浓度的变化。另外,由于激光雷达距离道路大约有60m,道路上机动车排放的颗粒物浓度会比较高,会向单方向扩散(另外一侧是高楼),与图中气溶胶浓度从道路中央向单方向递减一致,体现出了气溶胶粒子的动态扩散过程。尽管车流量与颗粒物浓度之间的总体变化趋势很一致,但也存在一定的差异,这可能与气溶胶粒子的扩散和累积有关。因为激光雷达摆放在3楼,探测的是路面上方的气溶胶后向散射信号,而汽车排放的细粒子向上扩散需要一段时间,在大气对流不是很强烈的时候,扩散时间会比较慢,会产生一定的滞后效应。总体来说,用半导体激光雷达能够有效地对机动车排放的颗粒物进行监测,研究其变化分布特性。

### 3 结论

激光雷达作为一种新型的大气气溶胶遥测手段,

提供了一种强有力的工具。作者利用激光雷达的实验数据反演大气气溶胶后向散射系数,与气溶胶质量浓度建立了线性关系,并结合车流量数据进行了分析。实验结果表明:大气后向散射系数与车流量具有很好的变化趋势,可以很好地反映机动车排放颗粒物的信息。机动车对大气颗粒物污染影响很大,利用激光雷达开展这方面的研究,能够对城市机动车辆的有效管理控制以及环境大气质量的治理提供重要的科学依据。由于不同型号的车排放颗粒物的程度不同以及气溶胶的复杂性,还需要做进一步的研究对这种方法进行改进。

### 参 考 文 献

- [1] YANG H, LIU W Q, LIU J C, *et al.* Monitoring and study of city tropospheric aerosol [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (2): 174-176 (in Chinese).
- [2] WANG G Ch, XIE H, WAN X W, *et al.* Variation of aerosol mass concentration and element composition with height in Beijing area [J]. *Research of Environmental Science*, 2004, 17 (1): 37-40 (in Chinese).
- [3] ZHAO M, MIAO M Q. The planet boundary layer [M]. Beijing: Meteorological Press, 1992: 3-18 (in Chinese).
- [4] DING G A, MENG Zh Y, YU H Q, *et al.* Measurement and research on ABL air pollution in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13 (s1): 82-91 (in Chinese).
- [5] SPINHRNE J D. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31 (1): 48-54.
- [6] SHIMIZU H, SASANO Y, NAKANE H, *et al.* Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area [J]. *Appl Opt*, 1985, 24 (5): 617-626.
- [7] KERKER M. The scattering of light and other electromagnetic radiation [M]. New York: Academic Press, 1969: 1-3.
- [8] MÜNKEL C, EMEIS S, MÜLLER W J, *et al.* Aerosol concentration measurements with a lidar ceilometer; results of a one year measuring campaign [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5235: 486-496.
- [9] HU B, ZHANG W, ZHANG L, *et al.* A study on scattering properties of aerosol particle over Xigu district of Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22 (4): 354-360 (in Chinese).
- [10] SUN J Q, ZHANG H F. A theoretical analysis of remote measurement of mass concentration of atmospheric dust using lidar [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, 2 (1): 36-43 (in Chinese).
- [11] MÜNKEL C, ERESMAA N, RÄSÄNEN J, *et al.* Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 124 (1): 117-128.

(上接第129页)

- [7] LI Y H, JIANG H T, LI H Q, *et al.* New progress in research of photonic crystal cavities [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33 (7): 864-868 (in Chinese).
- [8] BORODITSKY M, KRAUSS T F, COCCIOLI R, *et al.* Light extraction from optically pumped light-emitting diode by thin-slab photonic crystals [J]. *A P L*, 1999, 75 (8): 1036-1038
- [9] WANG H, OUYANG Zh B, HAN Y L, *et al.* Amplification of one-dimensional photonic crystals defect-mode laser [J]. *Acta Optica Sini-*

ca, 2006, 26 (11): 1691-1697 (in Chinese).

- [10] HARALD P, KAPON E. Photon localization in lattices of coupled vertical-cavity surface-emitting lasers with dimensionalities between one and two [J]. *Opt Lett*, 1997, 22 (8): 546-548.
- [11] OUYANG Zh B, XU G W, SUN Y L, *et al.* Tuning characteristics of photonic crystal micro-resonators [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16 (4): 399-401 (in Chinese).