

基于CCD后向散射激光信号的PM 2.5测量研究

胡 淼¹ 谢家亮¹ 吴端法¹ 曾 嵘¹ 李齐良¹ 周雪芳¹ 钱正丰¹ 魏一振¹ 项 震² 蔡 炬³

¹杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018

²浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

³成都信息工程学院通信工程学院, 四川 成都 610000

摘要 根据米散射理论和激光传播方程,建立PM 2.5颗粒物浓度与后向散射光强的关系模型,并提出了基于电荷耦合器件(CCD)后向散射激光雷达的实时PM 2.5颗粒物浓度的监测方法。设计了以532 nm波长的激光器为光源、CCD为接收器的后向散射激光雷达实验装置。根据获得的实时大气颗粒物后向散射图像,提取灰度值矩阵并分析了散射图像的光强分布;对比赛默飞世尔科技公司的PM 2.5监测仪(SHARP)的实验结果,拟合了PM 2.5颗粒物浓度与散射光强的5个关系式,拟合度均在0.95以上。这种成本较低、操作便利的实时PM 2.5颗粒物浓度监测装置的推广,有助于建立PM 2.5污染物的分布和运动模型并绘制污染地图,具有重要意义。

关键词 大气光学;颗粒物浓度;电荷耦合器件;后向散射激光雷达

中图分类号 TN958.98; TN202

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0201002

Measurement of PM 2.5 Concentration Based on the Charge-Coupled Device Backward Scattering Lidar

Hu Miao¹ Xie Jialiang¹ Wu Duanfa¹ Zeng Rong¹ Li Qiliang¹ Zhou Xuefang¹

Qian Zhengfeng¹ Wei Yizhen¹ Xiang Zhen² Cai Ju³

¹College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

³College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract A theoretical measurement model of atmospheric particulate concentration is built, considering Mie scattering theory and laser propagation equation. An experimental device is designed to monitor the real-time PM 2.5 concentration is introduced by using a charge-coupled device (CCD) backward scattering lidar. The experimental system consists of a 532 nm wavelength laser as the light source and a CCD as detector of back scattering light. According to the real time image captured by the CCD, the gray level value matrix is extracted, while the intensity distribution of the scattering image is analyzed. Compared with the results of a PM 2.5 monitor for Thermo Fisher Scientific Company, five formulas about PM 2.5 concentration and scattering lighting are concluded with a fitting degree better than 0.95. A further popularization of this atmospheric particulate concentration monitoring device which is low in cost and convenient in use, will play a significant role in investigating the movement of PM 2.5 and depicting pollutant distribution.

Key words atmosphere optics; atmospheric particulate concentration; charge coupled device; back scatter lidar

OCIS codes 140.3325; 140.3480; 140.3515

收稿日期: 2014-07-28; 收到修改稿日期: 2014-09-18

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ13F010012, LY12F01006)

作者简介: 胡 淼(1982—),男,博士,副教授,主要从事激光晶体、微片激光器等方面的研究。

E-mail: miao_hu@foxmail.com

1 引 言

近20年来,我国能源、工业和交通等行业的快速发展带来了不可忽视的环境污染。其中,大气颗粒物的污染问题尤为突出^[1]。不同粒径的颗粒物伴随着人体呼吸沉积不同的呼吸道部位,其中粒径在10~100 μm的颗粒物被阻挡在鼻腔外;2.5~10 μm颗粒物大部分在鼻咽区截留;0.01~2.5 μm颗粒物沉积在支气管和肺部,也称为PM 2.5颗粒物,对人体危害最大。大气中空气动力学直径小于2.5 μm的悬浮颗粒物定义为PM 2.5。目前,PM 2.5颗粒物污染的监测及有效治理是我国环境保护部门及国家政府的目标,对人们的健康生活具有重要的现实意义^[1~4]。

现阶段,PM 2.5颗粒物污染的监测内容主要分为质量浓度监测和化学成分监测两大部分,我国目前常用的PM 2.5颗粒物监测方法主要是重量法^[5]。重量法的优点是测量精度较高,但设备昂贵、笨重、操作复杂。此外,重量法的工作对象局限为固定区域一段时间(一般为1 h)内颗粒物的质量总和,较难实现实时监测或任意区域扫描。采用CCD激光雷达对大气环境监测的方法,设备简单,反映及时,目前在已经国内外获得广泛应用。麻晓敏等^[6]利用CCD激光雷达提取大气侧向散射信号,并与仿真结果对比,表明CCD激光雷达对大气探测的可行性。Tao等^[7]利用CCD激光雷达的侧向散射信号,反演气溶胶相函数和垂直后向散射系数,通过实验证明侧向散射激光雷达和其他专业仪器的结果高度一致。孟祥谦等^[8~9]利用CCD激光雷达探测边界层气溶胶消光系数的垂直分布,并进一步计算出气溶胶散射相函数与大气能见度,实验结果与POM天空辐射计和Belfort能见度仪的观测结果吻合较好。CCD激光雷达在大气探测应用领域的不断发展完善,扩展了CCD激光雷达在大气环境监测等多方位的应用研究。本文设计了一种基于CCD成像的后向散射便携式激光雷达,用于监测PM 2.5颗粒物浓度实时变化。该装置具有成本较低、操作便利和反映实时等优点。由于系统采用单基结构,因此尚未实现雷达定距功能,采用双基结构可以实现较高精度的定距。利用CCD后向散射激光雷达的成本和实时性优势,可以在特定区域组建PM 2.5浓度监测网;利用网络数据建立PM 2.5的分布和运动模型,绘制街道精度的PM 2.5污染地图;并进一步对该地区未来几小时的PM 2.5颗粒物浓度进行预测。

2 测量原理和装置

根据颗粒物粒径尺度与光波长的关系,大气散射可以分为:瑞利散射、米氏散射和拉曼散射^[10]。当粒子远小于波长时称为瑞利散射;当粒子半径相对于波长之比增大到0.03时,就逐渐过度到米氏散射。在浮尘、轻雾、大雾和浓雾等雾霾天气条件下,由于大气中的悬浮粒子尺度范围主要集中在为0.001~10 μm,因此采用532 nm波长的激光源,满足米散射条件。根据米散射的理论,单个粒子米散射的光强相函数为^[10~11]

$$\beta(\theta, \alpha) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 \alpha^2} [S_1^2(\theta) \sin^2 \phi + S_2^2(\theta) \cos^2 \phi], \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, α 为粒子的半径, θ 为散射光与原激光传输方向的夹角, $S_1(\theta)$ 与 $S_2(\theta)$ 是关于 θ 的散射强度函数, ϕ 为偏振角。当散射角 $\theta=0^\circ$ 时,即满足后向散射条件,此时可以通过与激光束共轴的望远镜系统收集大

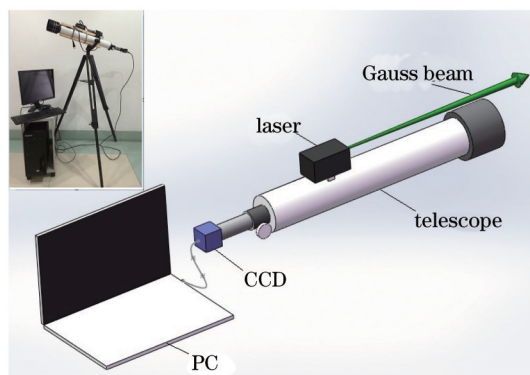


图1 后向散射CCD激光雷达装置图

Fig.1 Setup of the CCD backward scattering lidar

气颗粒物的散射光。如图1所示,CCD后向散射激光雷达主要由光发射单元和光检测单元两部分组成,其中光发射单元由532 nm波长的连续波激光器构成;光检测单元由望远镜、CCD和计算机构成。

在激光雷达系统运行时,激光器向特定目标区域发射532 nm波长的激光,受大气颗粒物作用,产生各个方向的散射光信号,后向散射光信号被光检测单元收集。由于大气散射光信号比较弱,CCD的感光灵敏度必须要足够小。分析CCD采集到的光散射信号图像,即可获得大气颗粒物的分布特征,进而实现大气颗粒物质量浓度的实时监测。

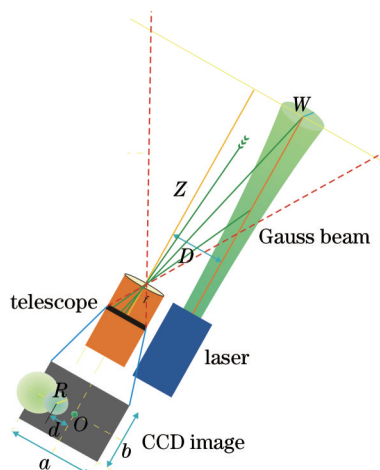


图2 后向散射成像原理框图

Fig.2 Schematic diagram of the backward scattering

图2中,望远镜光轴距离激光器光轴为D。CCD置于望远镜像焦平面f处,CCD视场长为a,宽为b。设激光束在大气中传输至距离激光器端口z处,根据比尔定律^[12]和高斯光束在真空中传输特性^[13],z处光强分布分别为

$$I(z,r) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] T, \quad (2)$$

式中前半部分为高斯光斑的光强分布, w_0 为激光束腰半径, $w(z)$ 为z处激光的束腰半径, I_0 为激光在端口处时的光强, T 为激光抵达z处的传输透射率。激光束在z处的光斑受到dz厚度的均匀空气层受大气颗粒物的作用,发生米散射。设单位质量大气颗粒物中不同粒径的颗粒数密度分布函数为 $N_1(\alpha)$, 忽略二次散射及大气分子对回波的吸收作用,根据(1)、(2)式可得;z高度处dz厚度的空气层后向散射光强到望远镜的总功率为

$$P(z) = \frac{KA dz}{z^2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^{3\omega(z)} 2\pi r I(z,r) \beta(\pi, \alpha) N_1(\alpha) M dr d\alpha, \quad (3)$$

式中K为系统接收光效率,A为望远镜透镜面积,M为单位体积的颗粒物质量浓度。令dz处的激光功率为

$$P_0 T = \int_0^{3\omega(z)} 2\pi r I(z,r) dr, \quad (4)$$

式中 P_0 为激光出射功率, $3\omega(z)$ 为光斑的积分界线,单位质量颗粒物中不同粒径颗粒物的后向散射总体相系数为

$$\xi(\pi) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \beta(\pi, \alpha) N_1(\alpha) d\alpha, \quad (5)$$

式中 $\beta(\pi, \alpha)$ 为 α 粒径的粒子后向散射的相函数。因此,(3)式变为

$$P(z) = \frac{P_0 M \xi(\pi) T^2 K A dz}{z^2}, \quad (6)$$

(6)式与文献[9]吻合。在数值模拟中将大气平均分为k层,每层大气的厚度dz为h,每层颗粒物散射光信号在CCD中成像,对应为k个成像光斑,将k个光斑的光强叠加即获得总散射光强。不同层的后向散射光在CCD

中所成的像,如图2左下角所示。由望远镜成像原理^[14],第 $t(1 \leq t \leq k)$ 层粒子后向散射光斑信号光斑圆心距 CCD 中心的距离 d 为

$$d(t) = Df / [(t - 1/2)h]. \quad (7)$$

式中 D 为望远镜与激光间距, f 为望远镜的焦距。第 t 层的像光斑半径为

$$R(t) = w(t)a / [2\varphi_a(t - 1/2)h]. \quad (8)$$

式中 φ_a 为望远镜长边对应的视场角, $w(t)$ 为距离激光器端口 $(t-1/2)h$ 处的光斑的半径。

取大气层的计算厚度为 5000 m, 分 1000 层, 每层厚度为 $h=5$ m; 粒径的积分上下限 $\alpha_1=0.001 \mu\text{m}$, $\alpha_2=10 \mu\text{m}$ 。考虑在同一地区的一段时间内, 当大气组分不发生突变的情况下, 单位质量大气颗粒物中不同粒径的颗粒数密度分布函数为 $N_i(\alpha)$ 不会发生改变^[15-16]; 同时根据定义可知, 单位质量颗粒物中不同粒径颗粒物的后向散射系数总和 $\xi(\pi)$ 同样为定值。选择实验环境为晴朗无月的夜空, 激光束竖直射向正天顶, 激光传输透射率 T 变化较小^[5]; 此外根据(6)式, 当激光的波长 λ , 束腰半径 W_0 , 初始功率 P_0 , 系统接收光效率 K , 望远镜透镜面积 A 确定时, 大气颗粒物后向散射光强不仅与单位体积的颗粒物质量浓度 M 线性相关, 亦和 PM 2.5 颗粒浓度线性相关。

3 实验结果分析

由于望远镜系统未加滤波片, 因此为了减小天空背景光的干扰, 实验时间地点选择在暑假里杭州郊区的下沙高教园区晚上 8 点 10 分至 10 点 20 分。激光器出射为基模高斯光束, 激光功率为 500 mW, 波长为 532 nm, 在激光器端口的束腰半径为 1 mm, 激光功率 1 h 的稳定性优于 99%; 接收光散射光的望远镜焦距为 80 cm, 口径为 10 cm。焦平面上 CCD 成像仪分辨率为 768 pixel×574 pixel, 像元尺寸大小为 $12.7 \mu\text{m} \times 9.8 \mu\text{m}$, 整体望远镜视场角仅为 12 mrad×7 mrad, 有效降低背景光的影响。CCD 的感光度为装配 $F=1.4$ 镜头时在 0.0002 lx 照度条件下输出 200 mV 电流; CCD 帧数为 50 frame/s, 即实验每秒可以输出 50 个测量数据, 每次测量时间最小可达 20 ms。望远镜轴与激光轴两轴相距 20 cm, 通过图像采集卡将 CCD 连接到计算机。当激光入射到大气中, 调节望远镜成像和激光轴, 使大气颗粒物散射光清晰成像于 CCD 中央。为了与赛默飞世尔科技公司的 PM2.5 监测仪的实验结果相比较(每小时输出 1 次数据), 后向散射激光雷达每间隔 1 min 获取一次数据, 并在 1 h 内获取 60 次求取平均值。实验期间地区周边无现开设的工厂, 颗粒数密度分布函数基本保持不变。

图 3(a)和(b)分别是在 PM 2.5 颗粒物质量浓度为 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, CCD 观测到的后向散射图。图 3(a)和(b)的左侧表示较近距离段颗粒物的后向散射, 而右侧表示较远距离段颗粒物的后向散射。设定 CCD 不开启自动平衡和增益, 图 3(b)的最大灰度值为 182, 图 3(a)的最大灰度值为 84, 图 3(b)的整体亮度明显比图 3(a)大, 此时 CCD 均未达到饱和。由于激光束为高斯光束, 由散射光斑强度由中心向上下对称衰减, 当衰减小于到 CCD 的最小分辨光强时, CCD 无法正常接受全部信号。

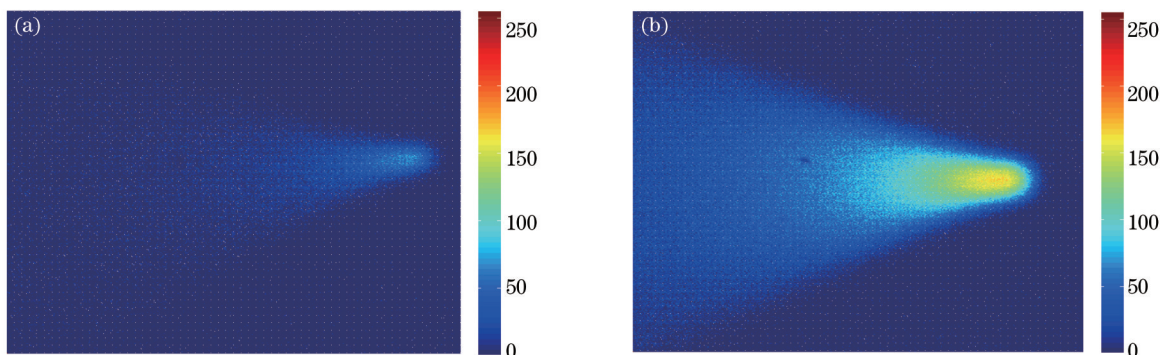


图 3 PM 2.5 颗粒物浓度为(a) $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$; (b) $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时 CCD 观测图

Fig.3 CCD image of backward scattering with PM 2.5 concentration at (a) $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$; (b) $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$

考虑激光束在 CCD 视场右侧 20 cm 处出射。根据成像原理, 近距离处, 每层颗粒物散射光强的成像角度变化较大, 成像重叠度较小; 而远距离段的每次颗粒物散射光强的成像角度变化不大, 成像重叠度较大。此

外,系统中望远镜和 CCD 的相对位置是对无穷远成像的,近距离处散射光强的成像弥散光斑较大。以上两种因素造成近距离散射光强即左侧光强也相对较弱。

为了去除噪声影响,对 CCD 拍摄到的图像进行数据预先处理。整体思路是选取整幅图片的高灰度值得像素点数据进行统计分析,并将整体灰度值进行累加分等级处理。取连续 1 h 内拍摄到的 60 张图片作为一组,提取出每张图片的灰度值矩阵,对 256 个灰度值进行统计,求得每个灰度值对应像素点个数 u_0, u_1, \dots, u_{255} ; 然后对该组的 60 张图片的每个灰度值对应像素点个数取平均,得到 $\bar{u}_0, \bar{u}_1, \dots, \bar{u}_{255}$; 进一步将每个灰度值乘以该灰度值对应的像素点个数,得到每个灰度值的总体相对亮度 L_0, L_1, \dots, L_{255} 。把灰度值大于 i 的亮度相加,得到灰度值大于 i 的总光强值:

$$S(i) = \sum_{k=i}^{255} L_k. \quad (9)$$

把灰度值 i 分为 5 个等级, $i=0, 20, 40, 60, 80$ 。得到了对应 PM 2.5 颗粒物浓度下的散射光强 $S(0), S(20), S(40), S(60), S(80)$ 。对不同 PM 2.5 颗粒物浓度的图片重复上述步骤,得到不同 PM 2.5 颗粒物浓度下 5 个等级的总光强值 $S(i)$ 。为得到 PM 2.5 颗粒物浓度与总光强值的关系,对不同 PM 2.5 颗粒物浓度下的总光强值 $S(i)$ 与预先设定的线性模型进行拟合统计,得到的结果如图 4 所示。图 4(a)~(e) 分别为 12 天内灰度值在 0、20、40、60、80; 以上范围的总光强与 PM 2.5 颗粒物浓度 N 的线性拟合曲线图。拟合得到的线性关系式分别为 $S(0)=103248.87N-3.93 \times 10^6$; $S(20)=105332.66N-2.01 \times 10^6$; $S(40)=77319.23N-2.05 \times 10^6$; $S(60)=50641.81N-1.50 \times 10^6$; $S(80)=33882.71N-1.10 \times 10^6$ 对应的拟合度分别为 0.957, 0.979, 0.981, 0.970, 0.956。其中,图 4(a) 与图 4(e) 的拟合度明显低于其余图像。图 4(a) 上的点整体分布距离拟合曲线较远,图 4(b)、图 4(c) 与图 4(d), 拟合曲线连接穿过大部分的点,其余的点也距离曲线较近,图 4(e) 中, PM 2.5 颗粒物浓度较低的光强值点与曲线偏离较大。

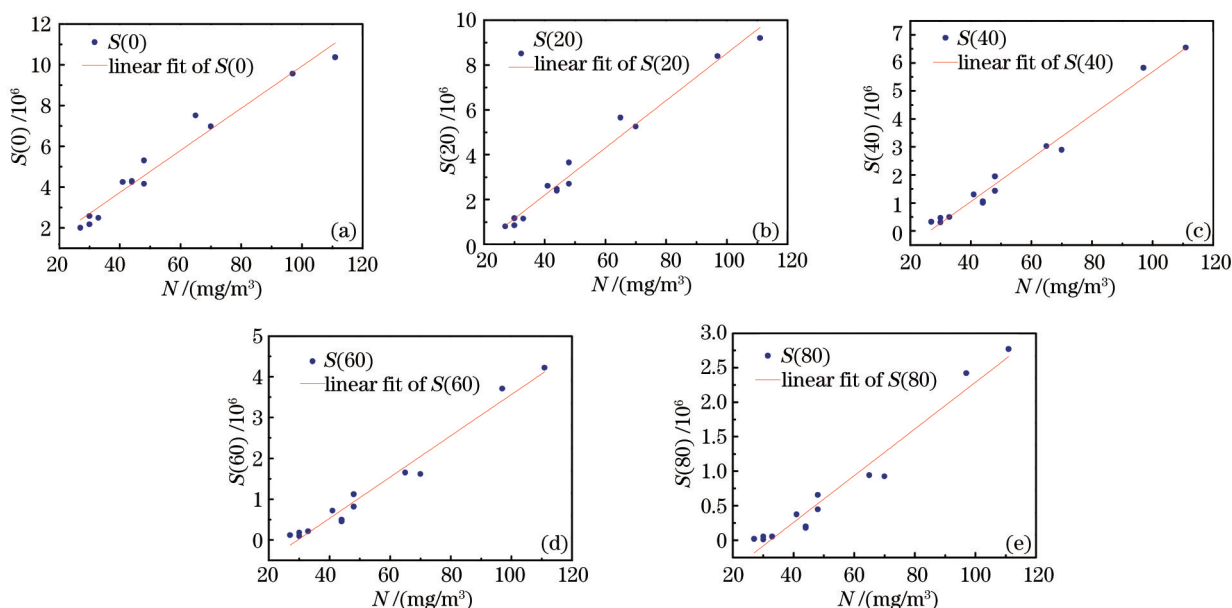


图 4 灰度值(a) 0; (b) 20; (c) 40; (d) 60; (e) 80 以上范围的总光强及拟合曲线

Fig.4 Total intensity of experimental results and corresponding fitting curve with gray level value above (a) 0; (b) 20; (c) 40; (d) 60; (e) 80

对于图 4(a),是因为试验中采用的 CCD 的灵敏度较高,容易受背景光的影响;同时由于 CCD 自身温度热效应带来的误差光亮点,这些误差的灰度值大部分在 10 以内,但全部叠加起来,仍会造成较大的误差。因此, $S(0)$ 的拟合度较其他等级的拟合度较低,不宜用来作为计算 PM 2.5 颗粒物浓度值的计算式。

对于图 4(e),当 PM 2.5 颗粒物浓度较低时,CCD 观测图中灰度值大于 80 的像素点较少,这样偶然性造成的误差较大,因此拟合度也相对较低。在验证计算较低的 PM 2.5 颗粒物浓度时,将该低浓度下的 $S(80)$ 代入拟合式中,计算出的浓度值与实际值偏差较大,因此 $S(80)$ 不宜作为低浓度的 PM 2.5 颗粒物浓度计算式。但是 $S(80)$ 由于处理的数据较少,因此计算速度较快。

通过对上面的拟合曲线图的分析以及对大量的 CCD 激光雷达拍摄到的图片计算出的 PM 2.5 颗粒物浓度值的验证,得出对于不同的 PM 2.5 颗粒浓度值应采用的合理的拟合式。对于大气颗粒物浓度值为 20~30 时,使用 S(20),S(40)等级的拟合式较为准确,实际情况下取 2 个计算值的均值可以准确表达 PM 2.5 颗粒物浓度值;对于颗粒物浓度值 30~40 时,则使用 S(20),S(40),S(60)等级的拟合式所得结果都较为相近,实际情况下取 3 个计算值的均值可以准确表达 PM 2.5 颗粒物浓度值;对于 PM 2.5 颗粒物浓度在 40 以上时,可采用 S(20),S(40),S(60),S(80)等级的拟合式的计算结果取均值。对各浓度值采用不同的拟合式进行计算大气颗粒物浓度,获得了较良好的结果,并且误差在 5% 以内。

4 结 论

通过 CCD 后向散射激光雷达观测大气颗粒物散射,获得了 CCD 观测图像,提取出灰度值矩阵,拟合 PM 2.5 颗粒物散射总光强与颗粒物浓度的关系式,得到了良好的线性关系式。说明通过 CCD 激光雷达直接观测大气颗粒物散射图像可以监测 PM 2.5 颗粒物浓度。

参 考 文 献

- 1 Zuo Lei. Experimental Study on Measuring PM2.5 in Complex Medium Using Laser Technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
左 磊. 复杂介质中 PM_{2.5} 的激光测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- 2 A K Sharma, K A Jensen, J Rank, *et al.*. Genotoxicity, inflammation and physico-chemical properties of fine particle samples from an incineration energy plant and urban air [J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2007, 633(2): 95-111.
- 3 Yang Honglong, Lu Chao, Liu Aiming, *et al.*. Analysis of aerosol optical properties and sources at Shenzhen [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1201003.
杨红龙, 卢 超, 刘爱明, 等. 深圳地区气溶胶的光学特征及来源分析[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1201003.
- 4 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, *et al.*. New method of aerosol extinction coefficient measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- 5 Zhang Wenge, Gao Sitian, Song Xiaoping, *et al.*. Concentration measurement and metrical technology of fine particulate matter PM2.5 [J]. China Powder Technology, 2013, 19(6): 69-72.
张文阁, 高思田, 宋小平, 等. 细颗粒物 PM_{2.5} 浓度测量及计量技术[J]. 中国粉体技术, 2013, 19(6): 69-72.
- 6 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0201001.
麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0201001.
- 7 Zongming Tao, Dong Liu, Zhenzhu Wang, *et al.*. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar [J]. Opt Express, 2014, 22(1): 1127-1134.
- 8 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Zhenzhu, *et al.*. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801003.
孟祥谦, 胡顺星, 王珍珠, 等. CCD 激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801003.
- 9 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Yingjian, *et al.*. Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0901001.
孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散射相函数与大气能见度的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0901001.
- 10 Li Lifang. The Study of Atmospheric Aerosol Particles Scattering Impact on Laser Propagation in the Atmosphere [D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2013.
李丽芳. 大气气溶胶粒子散射对激光大气传输影响的研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- 11 Gustav Mie. Beiträge zur optik trüber median, speziell kolloidaler metallösungen [J]. Annalen der Physik, 1908, 330(3): 377-445.
- 12 Xu Zubing. Analysis on the Characteristics of Laser Propagation in the Atmosphere Analysis on the Characteristics of Laser Propagation in the Atmosphere [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.

- 许祖兵. 激光大气传输特性分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- 13 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Chouyong, *et al.*. Laser Principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.
周炳琨, 高以智, 陈侗崧, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- 14 Zhao Kaihua, Luo Weiyin. New Concept Physics of Optical [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
赵凯华, 罗蔚茵. 新概念物理教程光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- 15 Yu Yangchun. Mass Size Distributions of Inorganic Water Soluble Ions in Atmospheric Particles in Jinan [D]. Jinan: Shandong University, 2011.
于阳春. 济南市大气颗粒物中水溶性无机离子的粒径分布研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- 16 Fan Xuebo, Liu Wei, Wang Guanghua, *et al.*. Size distribution of concentrations and chemical components in Hangzhou atmospheric partides [J]. China Environmental Science, 2011, 31(1): 13-18.
范雪波, 刘 卫, 王广华, 等. 杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布[J]. 中国环境科学, 2011, 31(1): 13-18.

栏目编辑: 何卓铭