

基于 CCD 侧向散射激光雷达的 PM_{2.5} 浓度测量研究

胡 淼¹ 吴端法¹ 李齐良¹ 周雪芳¹ 魏一振¹ 毕美华¹ 杨国伟¹ 宋 旻² 李 鹏²

¹杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018

²国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205

摘要 基于侧向散射激光雷达方程和 Mie 散射理论,建立了 PM_{2.5} 浓度与侧向散射光强的关系模型,提出了一种基于电荷耦合器件(CCD)实时监测近地面 PM_{2.5} 浓度的方法。设计了以波长 532 nm 激光器为光源、CCD 为接收器的侧向散射激光雷达装置,利用该装置测量了散射角在 15°~45°之间的侧向散射回波信号图,从回波信号图提取灰度值矩阵并分析其光强分布。与赛默飞世尔科技公司 PM_{2.5} 监测仪(SHARP)提供的测量结果对比,拟合了 PM_{2.5} 浓度与 3 个灰度等级光总能量的关系式,拟合度均在 0.97 以上。该装置具有操作便利、移动便捷、监测实时、成本较低的特点,在近地面比后向散射激光雷达具有更高的精度与实用性,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。

关键词 大气光学; PM_{2.5}; 电荷耦合器件; 侧向散射激光雷达

中图分类号 TN958.98; TN202 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1101002

Measurement Study of PM_{2.5} Concentration with Side-Scattering Lidar Based on CCD

Hu Miao¹ Wu Duanfa¹ Li Qiliang¹ Zhou Xuefang¹ Wei Yizhen¹ Bi Meihua¹
Yang Guowei¹ Song Yang² Li Peng²

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

²State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China

Abstract Based on the side-scattering lidar equation and Mie scattering theory, the relational model of PM_{2.5} concentration and side-scattered light intensity is built, and a method for real-time monitoring near-ground PM_{2.5} concentration based on charge-coupled device(CCD) is proposed. A side-scattering lidar device is designed, which uses the laser with 532 nm wavelength as light source and CCD as the receiver. The side-scattering echo signal with scattering angle from 15° to 45° is measured with this device. The gray value matrix is extracted from the echo signal image, and the light intensity distribution in the echo signal image is analyzed. Compared with the measurement results provided by SHARP, a PM_{2.5} monitor from Thermo Fisher Scientific Company, the formula between PM_{2.5} concentration and total energy of three gray levels is fitted with a fitting degree better than 0.97. The device has the characteristics of convenient operation, convenient movement, real-time monitoring and low cost. It has a higher precision and practicality than the backscatter lidar in near-ground, which contributes to establish the distribution and movement model of PM_{2.5} pollutants and make a map of pollution.

Key words atmosphere optics; PM_{2.5}; charge-coupled device; side-scattering lidar

OCIS codes 010.0280; 140.3325; 140.3480; 140.3515

1 引 言

PM_{2.5} 是空气动力学直径小于 2.5 μm 的气溶胶颗粒物,也是我国空气污染的首要污染物。PM_{2.5} 能够进入人体的支气管和肺部,引发哮喘、支气管炎等方面的疾病,因此准确测量 PM_{2.5} 浓度与人类健康息息

收稿日期: 2016-05-03; **收到修改稿日期:** 2016-06-24

基金项目: 中国气象局大气探测重点开放实验室课题(KLAS201409)、“国民核生化灾害防护国家重点实验室”开放基金(SKLNBC2015-03)

作者简介: 胡 淼(1982—),男,博士,副教授,主要从事激光雷达研制及探测方面的研究。E-mail: miao_hu@foxmail.com

相关。目前 PM_{2.5} 污染的实时监测及有效治理是我国环境保护部门及国家政府的目标^[1-2]。

现阶段,PM_{2.5} 污染的监测主要分为质量浓度监测、化学成分监测,我国主要采用重量法,其主要优点是测量精度较高,但设备昂贵、笨重、操作复杂并且较难实现实时监测任意区域 PM_{2.5} 浓度^[2]。电荷耦合器件(CCD)激光雷达装置具有设备简易、移动便捷、反应实时的优点,因此被广泛地采用。胡森等^[3]提出了基于 CCD 后向散射激光雷达实时 PM_{2.5} 浓度的监测方法,建立了 PM_{2.5} 浓度与后向散射光强的关系模型,但是后向散射激光雷达在近地面存在着固有的不完全交叠区,所探测的近地面大气回波信号低于真实的大气回波信号,使测量结果有比较大的误差^[4],其拟合了 5 个等级的 PM_{2.5} 预测模型,在一定环境下应选择相应等级的预测模型,但实际测量中并不能预知 PM_{2.5} 浓度的大小,使选择恰当的预测模型具有一定的困难,并且不同等级的预测模型会对测量结果造成相当大的影响,限制了该后向散射激光雷达的广泛使用。何涛等^[5]用 355 nm 后向散射激光雷达结合线性回归模型拟合了气溶胶消光系数和 PM_{2.5} 浓度的关系,并研究了反演精度,但该方法需要首先测出气溶胶消光系数,增加了实验的复杂度,该激光雷达在近地面测量 PM_{2.5} 浓度时同样要避免雷达探测盲区,这个盲区正是和人们联系最密切的区域。

侧向散射激光雷达是近年来正在研究的一项新技术,它通过分开放置发射与接收单元,避免了后向散射激光雷达不完全交叠区的影响,极大提高了近地面的探测精度和近距离段空间分辨率。麻晓敏等^[6]提出了基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法,证明了侧向散射激光雷达测得的数据是可靠、可行的,为利用侧向散射激光雷达测量近地面 PM_{2.5} 浓度奠定了基础。

本文设计了基于 CCD 侧向散射激光雷达测量 PM_{2.5} 质量浓度(下文简称 PM_{2.5} 浓度)的装置,推导了测量理论,对 PM_{2.5} 浓度与 3 个灰度等级光总能量进行了拟合,并将测量结果与赛默飞世尔科技公司 PM_{2.5} 监测仪(SHARP)测得结果进行对比检验。

2 原理与装置

研制的侧向散射激光雷达装置主要由 3 部分组成:发射单元、接收单元和计算机。发射单元是 Nd:YAG 激光器,出射激光为连续基模高斯光束,发射功率为 500 mW,波长为 532 nm。接收单元为 CCD,其型号为 Watec WAT-902H2,分辨率为 768 pixel×574 pixel,像元大小为 12.7 μm×9.8 μm;CCD 装配焦距 $f=1.4$ 的镜头时在 0.0002 lx 照度条件下输出电压为 200 mV,CCD 帧数为 50 frame/s,即每秒可以输出 50 个测量数据。计算机上装有与 CCD 相匹配的视频采集卡,用于采集并实时显示侧向散射回波信号图。

一般情况下,当气溶胶颗粒粒径与发射激光的波长之比大于 0.03 时,可以用 Mie 散射理论研究激光与大气发生相互作用的规律^[10]。在浮尘、轻雾、大雾和浓雾等雾霾天气条件下,大气气溶胶颗粒粒径范围主要集中在 0.01~10 μm,因此采用 532 nm 波长的激光源来探测 PM_{2.5} 的浓度,满足 Mie 散射条件^[3]。所设计装置的工作原理为:向大气水平略向上出射一束激光,激光与大气发生相互作用,侧向散射光中包含了分子和气溶胶的相应信息,也记录了 PM_{2.5} 的相应信息。在获取侧向散射回波信号图的同时记录每次测量期间实验地点的 PM_{2.5} 浓度值。假设大气为同向介质,大气成分的组成比例和气溶胶颗粒数密度分布在实验测量期间不发生突变,通过仿真拟合出侧向散射回波信号图中的灰度值与 PM_{2.5} 浓度之间的关系,建立实时测量 PM_{2.5} 浓度值的模型。

CCD 侧向散射激光雷达测量原理如图 1 所示,侧向散射激光雷达方程^[7]为

$$E(z, \theta) = \frac{E_0 K A T_r T_z \beta_{\text{total}}(z, \theta) dz}{R^2}, \quad (1)$$

式中 $E(z, \theta)$ 为 z 处散射角为 θ 时 CCD 接收到的侧向散射光能量, E_0 为激光器出射能量, K 为系统常数, A 为 CCD 有效接收面积, T_z 和 T_r 分别为 z 程和 r 程的大气透射率, $\beta_{\text{total}}(z, \theta)$ 为 z 处 CCD 在 $d\theta$ 视场内分子和气溶胶颗粒的侧向角散射系数, dz 为散射角宽度 $d\theta$ 对应的长度, R 为 r 程的长度,有

$$dz = \frac{R^2}{D} d\theta, \quad (2)$$

式中 D 为 CCD 到出射激光束的垂直距离。在实际测量中 D 为 1 m, 散射角 θ 范围为 15°~45°, r 程与 z 程的距离范围为 3.864~4.146 m, 假设能见度为 2500 m, 则大气消光总系数 $\sigma_s(z)$ ^[7] 为 1.778 km⁻¹, r 程与 z

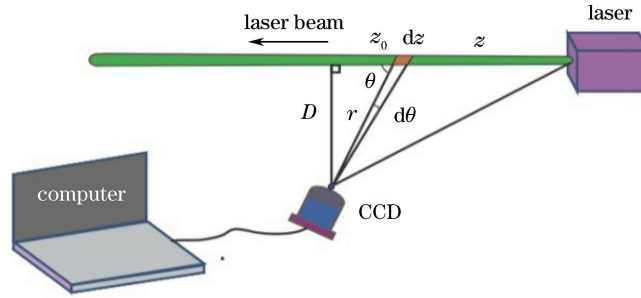


图 1 CCD 侧向散射激光雷达测量原理图

Fig. 1 Schematic of CCD side-scattering lidar device

程透射率乘积为^[8]

$$T_z T_r = \exp \left[- \int_0^{2.732} \sigma_s(z') dz' - \int_0^{1.414} \sigma_s(r') dr' \right] = 99.27\%, \quad (3)$$

式中 $T_z T_r$ 可近似为 1; $d\theta$ 为 CCD 像元角宽度, 在这里可近似为一常数。所以(1)式可转化为

$$E(\theta) = E_0 K A d\theta \beta_{\text{total}}(\theta). \quad (4)$$

单位质量颗粒物侧向角散射系数可表示为^[3]

$$\beta_{\text{total}}(\theta) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \beta_{\text{aer}}(\theta, \alpha) N(\alpha) d\alpha + \beta_{\text{atm}}(\theta) N_{\text{atm}}, \quad (5)$$

式中 $N(\alpha)$ 是 α 粒径气溶胶颗粒谱分布, $\beta_{\text{aer}}(\theta, \alpha)$ 为 α 粒径的气溶胶颗粒角散射系数, α_1, α_2 分别为气溶胶最小和最大粒径, $\beta_{\text{atm}}(\theta)$ 为分子角散射系数, N_{atm} 为单位体积的分子数(可近似为常数)。实验中将实际测量水平区域 3 m 内颗粒物等效为均匀混合的气溶胶粒子, (5)式可近似为

$$\beta_{\text{total}}(\theta) = \beta_{\text{aer}}(\theta) N_{\text{aer}} + \beta_{\text{atm}}(\theta) N_{\text{atm}}, \quad (6)$$

单个气溶胶粒子角散射系数^[7]为

$$\beta_{\text{aer}}(\theta) = \frac{\beta_s}{4\pi} p(\theta), \quad (7)$$

式中 $\frac{\beta_s}{4\pi}$ 为气溶胶颗粒所有方向的角散射截面平均值, 是一常数; $p(\theta)$ 为气溶胶散射相函数。设 PM2.5 的浓度为 M , 大气成分组成比例在实验测量期间未发生变化, 单位质量 PM2.5 颗粒的比例系数为 c , 则气溶胶单位体积的颗粒数为^[9]

$$N_{\text{aer}} = \frac{6M}{\pi c \rho \alpha^3}, \quad (8)$$

式中 ρ 为气溶胶颗粒密度, 所以(1)式可表示为

$$E(\theta) = \frac{3E_0 K A d\theta \beta_s p(\theta)}{2\pi^2 \rho c \alpha^3} M + E_0 K A d\theta \beta_{\text{atm}}(\theta) N_{\text{atm}}. \quad (9)$$

本实验研究 θ 在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 之间 CCD 记录的光强与 PM2.5 浓度的关系, 假定每天测量的数据只是 PM2.5 浓度上的差别, 分子和气溶胶颗粒的粒径大小在测量期间维持不变; 气溶胶散射相函数和分子散射系数均只与散射角有关, 每次测量的散射角范围均保持不变, 所以散射相函数和分子散射系数在本实验中总体保持不变。忽略二次及多次散射的影响, 可从(9)式得出 CCD 接收的光能量与 PM2.5 浓度呈线性关系, 将 CCD 的 GAMMA 值设置为 1^[11], CCD 接收的光能量与接收到的电压成正比, 也与灰度值成正比, 所以 CCD 像元灰度值与 PM2.5 浓度呈线性相关。

3 实验结果分析

为减少背景光和干扰光的影响, 实验时间选在 20:00—20:30, 实验地点选在杭州下沙高教园区杭州电子科技大学科技楼 10 楼楼顶。激光器置于三脚支架上, 调整云台上的控制杆使激光束水平略向上出射。

CCD 置于三脚支架上,与激光束的垂直距离为 1 m,CCD 的 GAMMA 值设定为 1,不开启自动平衡与增益,将 CCD 连接到有匹配视频采集卡通道的计算机,打开计算机 Visio2008 平台上基于 Opencv 库的 C++ 程序,用于捕获侧向散射回波信号图。经多次调整和严格的计算,使 CCD 接收的散射角范围为 $15^\circ \sim 45^\circ$,使侧向散射回波信号图尽可能居中显示,固定好装置中各单元的相对位置,方便每次数据的测量。通过赛默飞世尔科技公司的 PM2.5 监测仪记录实验地点的 PM2.5 浓度值,为更好地进行实验结果的对比,侧向散射激光雷达装置每隔 60 s 获取一次数据,在 1 h 内获取 60 次求取平均值。为了有效提取 PM2.5 颗粒物侧向散射光信号,在获取侧向散射回波信号图的同时,还需要获取没有激光发射的 CCD 背景图,侧向散射回波信号图与 CCD 背景图对齐后作差值运算,获得去背景光侧向散射回波信号图。实验测量持续 1 个月,在整个测量周期内假设分子和气溶胶颗粒的粒径大小维持不变。

图 2(a)~(c)为 PM2.5 浓度为 $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时的侧向散射回波信号图、CCD 背景图、去背景光侧向散射回波信号图;(d)~(f)为 PM2.5 浓度为 $95.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时的侧向散射回波信号图、CCD 背景图、去背景光的侧向散射回波信号图。图 2(c)、(f)的最大灰度值分别为 34、87,图 2(f)的整体亮度明显高于图 2(c)的整体亮度。

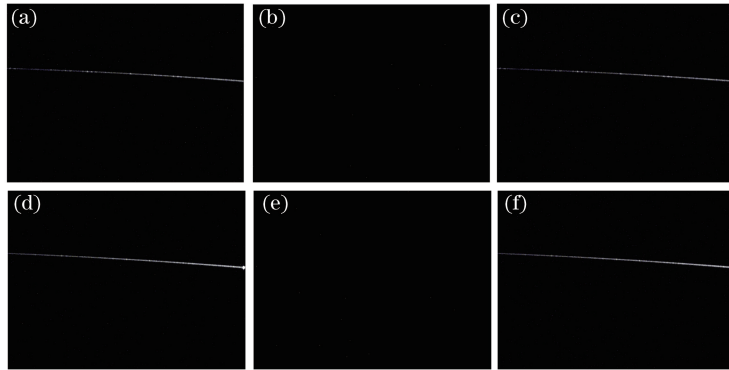


图 2 (a)~(c) PM2.5 浓度为 $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时的回波信号图、CCD 背景图、去背景光回波信号图;(d)~(f) PM2.5 浓度为 $95.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时的回波信号图、CCD 背景图、去背景光回波信号图

Fig. 2 (a)-(c) Echo signal image, CCD background image, echo signal image with no background light when PM2.5 concentration is $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; (d)-(f) echo signal image, CCD background image, echo signal image with no background light when PM2.5 concentration is $95.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$

为了进一步去除噪声影响,对去背景光侧向散射回波信号图进行数据预处理。整体思路是选取整幅图片高灰度值的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。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的像素点个数 $\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{255}$,对该组 60 张图片每个灰度值对应的像素点个数取平均,得到 $\overline{\mu_0}, \overline{\mu_1}, \dots, \overline{\mu_{255}}$,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 的光总能量 $S(i) = \sum_{k=i}^{255} L_k$ 。把灰度值 i 分为 3 个等级, $i = 20, 40, 60$,得到对应 PM2.5 浓度下的光总能量 $S(20), S(40), S(60)$ 。对不同 PM2.5 浓度的图片重复上述步骤,得到不同 PM2.5 浓度下 3 个灰度等级的光总能量 $S(i)$ 。为得到 PM2.5 浓度值与总光强值的关系,把 $S(i)$ 与预先设定的线性模型进行拟合,得到的结果如图 3 所示。

图 3(a)~(c)分别为 15 天灰度值在 20、40、60 以上光总能量与 PM2.5 浓度的拟合曲线图;拟合得到的线性关系式分别为 $M_1 = [5.517 \times 10^{-4} S(20) + 19.3233] \mu\text{g}/\text{m}^3$, $M_2 = [10.2 \times 10^{-4} S(40) + 18.59603] \mu\text{g}/\text{m}^3$, $M_3 = [16.8 \times 10^{-4} S(60) + 15.32052] \mu\text{g}/\text{m}^3$; M_1, M_2, M_3 的拟合度分别为 0.99483、0.99821、0.97979,均具有较高拟合度。从图 3 中可以看出 3 个灰度等级光总能量与 PM2.5 浓度具有良好的线性关系。

为验证该预测模型的可靠性,分别于天气晴朗、空气质量等级优良的 2016 年 6 月 28 日、2016 年 7 月 3 日的 22:00—02:00,在杭州电子科技大学 2 号教学楼楼顶用侧向散射激光雷达装置每隔 1 h 捕获一次回波信号图,同时利用 SHARP 测量相同环境下的 PM2.5 浓度值,将所有侧向散射回波信号图读入已编程序中,分别利用 M_1, M_2, M_3 关系式自动计算出 3 个等级的 PM2.5 浓度值,与 SHARP 测得的 PM2.5 浓度值进行

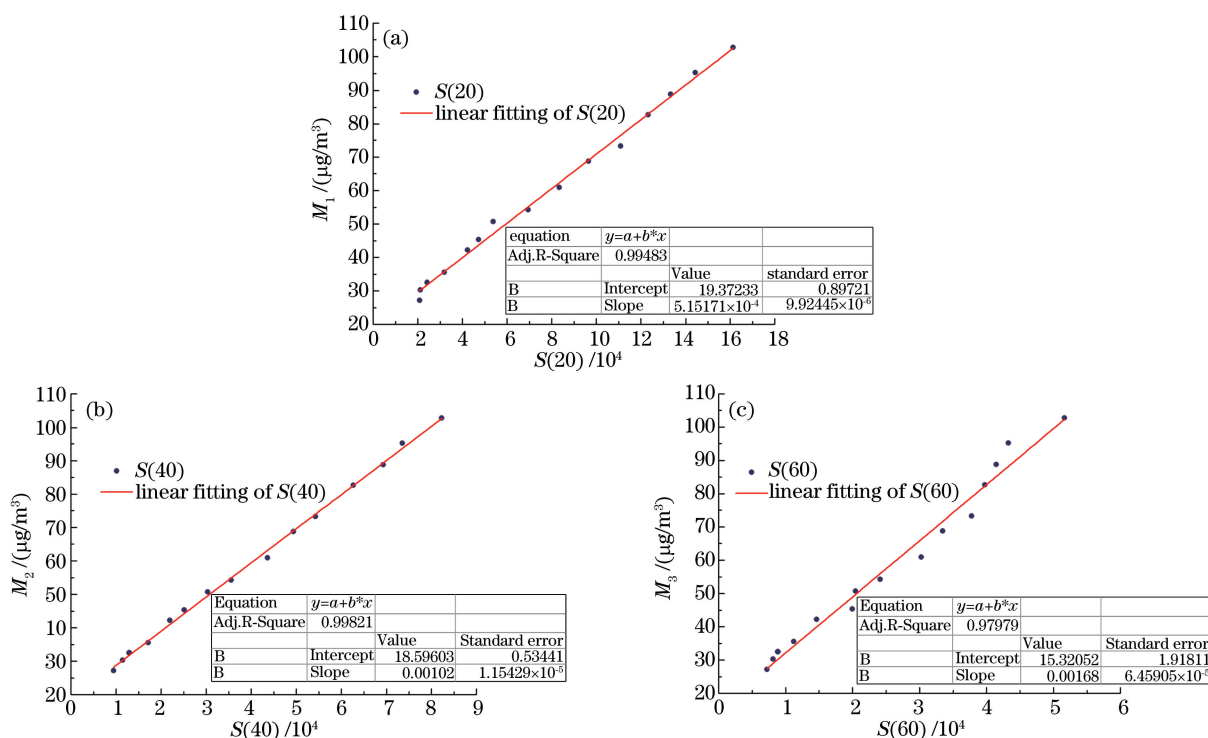


图 3 灰度值在(a) 20、(b) 40、(c) 60 以上时光总能量与 PM2.5 浓度拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of total light energy with gray level values above (a) 20, (b) 40, (c) 60 and PM2.5 concentration 对比验证,如图 4 所示。

从图 4(a)、(b)可以看出:利用 M_1 、 M_2 、 M_3 这 3 个等级的预测模型合理有效,均在合理的误差范围内,说明任意选择这 3 个等级的预测模型均能达到准确有效地测量当地 PM2.5 浓度值的目的;当 PM2.5 浓度在 $20 \sim 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,采用 M_1 和 M_2 预测模型与 SHARP 测得的结果更为接近, M_3 预测模型测得结果偏低, M_3 预测模型更适于高 PM2.5 浓度值的测量。可根据实际情况选择更合理的预测模型,也可选择多个预测模型然后对结果取平均值,较大地改善了胡森等^[3]提出的 5 个预测模型。本方法剔除了 5 个预测模型中 0 和 80 等级的预测模型,使选择更方便,更具有实用性,进一步说明了侧向散射激光雷达比后向散射激光雷达更适合近地面 PM2.5 浓度的测量。

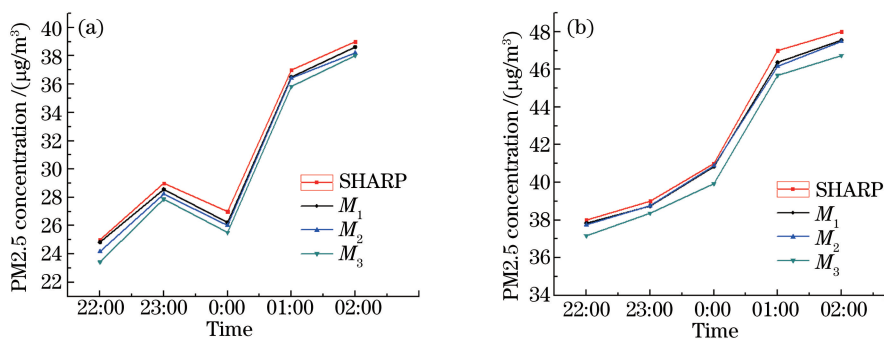


图 4 利用 M_1 、 M_2 、 M_3 式得到的 PM2.5 浓度与 SHARP 测得的 PM2.5 浓度对比图。

(a) 2016 年 6 月 28 日; (b) 2016 年 7 月 3 日

Fig. 4 Comparison of PM2.5 concentrations measured with SHARP and obtained from M_1 、 M_2 、 M_3 .

(a) June 28th, 2016; (b) July 3th, 2016

4 结 论

通过基于 CCD 的侧向散射激光雷达装置直接观测大气颗粒物散射,获得了侧向散射回波信号图,提取

出其灰度值矩阵,对相应灰度等级光总能量与 PM_{2.5} 浓度进行拟合,得到了 3 个等级良好的线性关系式,实际测量中可选择任意一个关系式,也可以选择多个再取平均值。结果表明,侧向散射激光雷达装置可以实时监测近地面 PM_{2.5} 浓度,比后向散射激光雷达装置测量结果更准确,实用性更强。

参 考 文 献

- 1 Zuo Lei. Experimental study on measuring PM_{2.5} 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 Zhang Wenge, Gao Sitian, Song Xiaoping, *et al.* Concentration measurement and metrical technology of fine particulate matter PM_{2.5}[J]. China Powder Science and 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.
- 3 Hu Miao, Xie Jialiang, Wu Duanfa, *et al.* Measurement of PM_{2.5} concentration based on the charge-coupled device backward scattering lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0201002.
胡 淼, 谢家亮, 吴端法, 等. 基于 CCD 后向散射激光信号的 PM_{2.5} 测量研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0201002.
- 4 He Yinghong, Zheng Yuchen, Cheng Juan, *et al.* The correction of short-range laser lidar returns with fitting to lidar range-adjusted power[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(3): 289-292.
贺应红, 郑玉臣, 程 娟, 等. 米氏散射激光雷达近场距离校正函数曲线拟合法修正[J]. 光学学报, 2005, 25(3): 289-292.
- 5 He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.* Study of accuracy of lidar inversion PM_{2.5} concentration[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0113001.
何 涛, 侯鲁健, 吕 波, 等. 激光雷达探测反演 PM_{2.5} 浓度的精度研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0113001.
- 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 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.
- 8 Sun Jingqun. Laser atmospheric detection[M]. Beijing: Science Press, 1986.
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- 9 Li Yijun. Theoretical and experimental study on particulate density and granularity measurement based on Mie scattering theory[D]. Taiyuan: North University of China, 2005.
李亦军. 基于 Mie 散射的微粒浓度和粒度测试的理论实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- 10 Li Lifang. The study of atmospheric aerosol particles scattering impact on laser propagation in the atmosphere[D]. Taiyuan: North University of China, 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 You Xiong. Method of transforming digital video signals into display colorimetry and vice versa based on Gamma correction[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1995, 24(1): 57-63.
游 雄. 基于 Gamma 校正的数字视频信号与显示色度的变换方法[J]. 测绘学报, 1995, 24(1): 57-63.