

基于侧向散射激光雷达的 PM_{2.5} 浓度测量误差

陈松, 胡淼, 曾然, 李齐良, 周雪芳, 蔡美伶, 聂佳林, 汪延安

杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018

摘要 根据 CCD 侧向散射激光雷达(Clidar)及 Mie 散射理论,建立侧向散射光强分布与 PM_{2.5} 浓度的关系模型,并分析测量误差。在研究过程中,搭建以波长为 532 nm 的激光器为光源、CCD 为接收器的 Clidar PM_{2.5} 浓度测量系统装置;将获取的侧向散射回波信号图与 BAM-1020 颗粒物监测仪记录的 PM_{2.5} 浓度进行对比,建立高、低增益下各等级模型的关系式。将高、低增益各等级模型的 PM_{2.5} 预测值与实际测量结果进行对比,得到各模型的平均误差、残差方差和综合偏差率统计量,并确定最佳反演精度模型的增益和等级 i 值。结果表明:当 PM_{2.5} 浓度在 $0\sim 70\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内时,高增益模型的反演精度高于低增益模型;对于高增益模型, $S(20)$ 模型的反演精度最高。

关键词 大气光学; 大气污染监测; 激光雷达; 侧向散射; PM_{2.5}; 测量误差

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1201003

Measurement Error of PM_{2.5} Concentration Based on Side Scattering Lidar

Chen Song, Hu Miao, Zeng Ran, Li Qiliang, Zhou Xuefang, Cai Meiling,
Nie Jialin, Wang Yan'an

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract Based on the CCD side scattering lidar (Clidar) and Mie scattering theory, a model of the relationship between the side scattering light intensity distribution and the PM_{2.5} concentration is established, and the measurement error is analyzed. In the study, the system setup of Clidar PM_{2.5} concentration measurement, which uses a laser at 532 nm as a light source and a CCD as a receiver, is constructed. The obtained side scattering echo signal is recorded to compare with the PM_{2.5} concentration measured by the BAM-1020 particle monitor, and hierarchical model expressions under high and low gains are built. When we compare the predicted values of hierarchical model PM_{2.5} concentration with the measured values, the average error, residual variance and comprehensive deviation rate statistics of each model are obtained. The results show that the inversion accuracy of the high gain model is better than that of the low gain model when the PM_{2.5} concentration is in the range of $0\sim 70\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. In the high gain model, the inversion accuracy of $S(20)$ model is the highest.

Key words atmospheric optics; air pollution monitoring; lidar; side scattering; PM_{2.5}; measurement error

OCIS codes 010.1290; 010.1120; 010.1310

1 引 言

近年来,城市空气污染的治理力度有所加大,但是灰霾等天气仍然频繁出现。目前,大气气溶胶^[1]已经直接影响到国民生计。大气中空气动力学直径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物(PM_{2.5})引起了人们的广泛关注。史博等^[2-4]提出了探测近地面 PM_{2.5} 时空分布的方法。常规的 PM_{2.5} 探测仪器只能探测地表附近 PM_{2.5} 的

收稿日期: 2017-05-22; **收到修改稿日期:** 2017-07-11

基金项目: 浙江省公益技术研究工业项目(2016C31068)、中国气象局大气探测重点开放实验室课题(KLA201409)、国民核生化灾害防护国家重点实验室开放基金(SKLNBC2015G03)

作者简介: 陈松(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: 403038524@qq.com

导师简介: 胡淼(1982—),男,博士,副教授,主要从事激光雷达研制及激光雷达探测方面的研究。

E-mail: miao_hu@foxmail.com(通信联系人)

浓度变化,且实时性较差(一般 1 h 输出一次数据),较难获取 PM2.5 的实时时空分布。激光雷达的出现使得 PM2.5 的实时时空探测成为可能^[5]。Barnes 等^[6-7]使用收发装置分离的激光雷达装置探测了当地大气情况,证明了使用该装置探测大气气溶胶消光系数的空间分布是切实可行的。孟祥谦等^[8-9]利用水平散射图像得到大气散射相函数的相对值,将其作为参数并反演了垂直方向的气溶胶消光系数分布廓线,反演得到的消光系数数值与合肥大气辐射观测站的双波长偏振 Mie 散射激光雷达的观测结果一致。麻晓敏等^[10]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的。胡森等^[11]提出了基于 CCD 后向散射激光雷达进行实时 PM2.5 浓度监测的方法。但是,在该方法中,由于激光发射光路与望远镜视场在近区内不完全重合,因此从地面到数百米高度的低空范围内的激光雷达存在探测盲区,气溶胶后向散射信号不能完全被探测到,而这一区域恰好为 PM2.5 的富集区,是气象和环境部门重点关注的区域。改进后的侧向散射激光雷达^[12]将发射装置与接收装置分两处放置,消除了后向散射激光雷达中几何因子产生的影响。在低空 PM2.5 富集区,PM2.5 的浓度测量精度大大提高,同时使用了侧向散射技术,使空间分辨率也得到了提高。这两种方法使得侧向散射激光雷达在测量低空 PM2.5 浓度分布时具有显著的优势。由于实时侧向散射激光雷达采用的 CCD 敏感度较高,容易受背景光的影响。CCD 接收到的侧向散射回波信号夹杂了大量的背景噪声,因此如何减少背景噪声的干扰并减小激光雷达的测量误差是当前的主要研究方向。

本文研究了 CCD 侧向散射激光雷达(Clidar)系统的 PM2.5 浓度测量误差。通过实验数据的拟合结果得到经验公式,将不同增益下各预测模型的反演值与实际测量结果进行对比,以平均误差、残差方差和综合偏差率统计量的角度对 Clidar 的测量误差进行分析。

2 测量原理和实验装置

根据颗粒物粒径尺度与激光波长的关系,将大气气溶胶颗粒散射分为瑞利散射、Mie 散射和拉曼散射。散射程度为粒子半径 r 与辐射波长 λ 的比例函数^[13],通常引用无量纲尺度数 $a = 2\pi r/\lambda$ 作为判别标准。当尺度数 a 远小于 0.1 时,视为瑞利散射;当尺度数 $a \geq 0.1$ 时,视为 Mie 散射;当尺度数 $a > 50$ 时,用几何光学进行计算。PM2.5 的颗粒直径不大于 $2.5 \mu\text{m}$,实验所用激光器发射连续基模高斯光束,波长为 532 nm。计算可知 $a \geq 0.1$,属于 Mie 散射范畴,可用 Mie 散射理论来研究激光与大气发生相互作用的规律。

Clidar 系统由激光发射、光学接收、几何定标及数据采集等子系统组成。图 1 为所研制的 Clidar 系统装置示意图,该 Clidar 系统的技术参数如表 1 所示。通过几何定标^[14]方法得到光束各散射点与 CCD 像元间的关系。CCD 前安装了一块中心波长为 532 nm 的干涉滤光片,以提高探测信号的信噪比。为了使回波信号包含的实际光束范围更大,调节 CCD 相机镜头使其光轴与激光器光束的光轴方向垂直,然后用三脚架固定激光发射和光学接收子系统的相对位置,以保证每次实验的散射角范围不变、提高实验的可重复性并方便每次数据的测量与记录。

对于 Clidar 系统,在散射角 θ 下 CCD 单个像素接收到的光功率为

$$P(\theta) = \frac{P_0 K A}{D} \beta(\theta) T_z T_r d\theta, \quad (1)$$

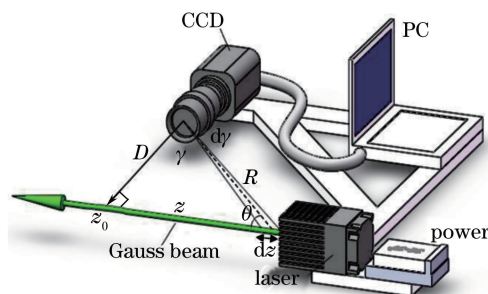


图 1 Clidar 系统装置示意图

Fig. 1 Diagram of Clidar system setup

表 1 Clidar 系统的关键技术参数

Table 1 Key technical parameters of Clidar system

Apparatus	Parameter	Value
CCD detector (Watec WAT-902H2)	Pixel array /pixel×pixel	768×576
	Pixel size /μm×μm	12.7×9.8
	Minimum illumination /lx	0.0001
	Angle per pixel /(°)	0.117
Lens (VM0410MPIR)	Focal length /mm	4-10
	Aperture number	3.2
	Horizontal angle of view /(°)	90
Laser (Nd : YVO ₄)	Wavelength /nm	532
	Pulse power /mW	500
Interference filter (ZLM-532ZDLGP-Y30)	Bandwidth /nm	5
	Peak transmittance /%	80
Image acquisition card (DH-CG300)	—	—
Computer (Dell-780MT)	—	—

式中 P_0 为激光器的发射功率, K 为系统常数, A 为接收光学器件的光圈, $\beta(\theta)$ 为总大气侧向散射系数, D 为 CCD 与激光光束的垂直距离, T_z 为激光在大气中传输至 z 处的总大气透过率(包括分子和气溶胶), T_r 为激光在 r 处产生的散射信号传输至 CCD 的透过率。 $T_z T_r$ 可近似为小于 1 的常数, $d\theta = d\gamma$, γ 为一个像素对应的视场角, 其中 θ 与 γ 的关系为 $\theta = \pi/2 - \gamma$ 。在实验测量过程中, P_0 保持相对稳定, A 保持不变, 激光光束与 CCD 的相对位置保持不变, θ 的范围可通过定标实验测得。在实验对应的视场角内 ($-10^\circ \sim 10^\circ$), 考虑每个像素对应的 $d\theta$ 为近似常数, 令常系数 $M_1 = P_0 K A T_z T_r d\theta / D$, 则(1)式可改写为 $P(\theta) = M_1 \beta(\theta)$, $\beta(\theta) = \beta_{\text{aer}}(\theta) N_{\text{aer}} + \beta_{\text{atm}}(\theta) N_{\text{atm}}$, 其中 $\beta_{\text{aer}}(\theta)$ 为单位粒子数气溶胶颗粒的角散射系数, $\beta_{\text{atm}}(\theta)$ 为单位分子数的角散射系数, N_{aer} 为气溶胶单位体积的颗粒数, N_{atm} 为单位体积的分子数^[8]。 $\beta_{\text{aer}}(\theta) = \beta_s p(\theta) / (4\pi)$, 其中 $\beta_s / (4\pi)$ 为气溶胶颗粒所有方向上的角散射截面平均值, 为一个常数, $p(\theta)$ 为气溶胶散射相函数。设 PM2.5 的浓度为 N , 则 $N_{\text{aer}} = 6N / (\pi c \rho \alpha^3)$, 其中 c 为单位质量 PM2.5 颗粒的比例系数, ρ 为气溶胶颗粒密度, α 为粒径, 因此 $\beta(\theta)$ 可表示为

$$\beta(\theta) = \frac{3\beta_s p(\theta)}{2\pi^2 \rho c \alpha^3} N + \beta_{\text{atm}}(\theta) N_{\text{atm}} \quad (2)$$

假定大气成分组成比例在实验测量期间未发生变化, 在每天测量的数据中, 只有 PM2.5 浓度存在差别, 分子和气溶胶颗粒的粒径大小在测量期间维持不变^[15], 因此 α , c 和 ρ 保持不变。 $p(\theta)$ 和 $\beta_{\text{atm}}(\theta)$ 均只与 θ 有关, 每次测量的 θ 范围均保持不变, 所以 $p(\theta)$ 和 $\beta_{\text{atm}}(\theta)$ 在本实验中总体保持不变, N_{atm} 可近似为常数, 令 $M_2 = 3\beta_s p(\theta) / (2\pi^2 \rho c \alpha^3)$, $M_3 = \beta_{\text{atm}}(\theta) N_{\text{atm}}$, M_2 、 M_3 均为常系数, 所以(1)式可表示为

$$P(\theta) = M_1 (M_2 N + M_3), \quad (3)$$

根据(3)式可得 $P(\theta)$ 与 N 呈线性关系。

3 实验结果分析

在实验过程中, 背景干扰光可能为月光、星光、路灯及建筑物等的反射光。为了减弱背景干扰光的影响, 实验时间选在晴朗的夜晚(19:00—23:00), 实验地点选在杭州电子科技大学科技馆楼顶。为了防止二次反射和地面干扰, 选择夜空作为背景, 同时在 CCD 前安装中心波长为 532 nm 的干涉滤光片, 以提高探测信号的信噪比。调整镜头焦距使激光散射信号在 CCD 中清晰成像, 选择合适的光圈以增大 CCD 的动态范围, 并防止 PM2.5 浓度过大导致的信号溢出。为了与 BAM-1020 颗粒物监测仪的测量结果进行比较, Clidar 系统每隔 1 min 采集 1 组数据, 利用程序自动捕捉并保存 50 帧回波信号图, 1 h 内得到 60 幅信号图, 并求取平均值。BAM-1020 颗粒物监测仪每小时得到 1 组 PM2.5 质量浓度平均数据。实验期间地区周边无新开设的工厂, 气溶胶颗粒密度分布函数基本保持不变。

在处理回波信号图时,为了进一步减弱天空背景光和自身热效应等噪声的干扰,将 50 幅图像各个相同位置像素点上的灰度值进行叠加,然后求出各个像素点灰度的平均值。提取回波信号图的灰度值矩阵,绘制相应的伪彩图以观察噪声的变化。图 2(a)~(c)为经过叠加处理后不同 PM2.5 浓度的回波信号伪彩图,实验证明噪声平均化法能够有效消除背景光和自身热效应的影响,这对基于 CCD 激光雷达侧向散射信号的提取具有重要意义。为了获得光强分布总值,对 CCD 拍摄到的图像进行数据处理^[16],整体思路是选取整幅图像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并进行分等级处理。将每次捕捉到的 50 张图像作为 1 组,提取每张图像的灰度值矩阵,对 256 个灰度值进行分等级统计,求得每个灰度值对应的像素点个数 u_0, u_1, \dots, u_{255} ; 然后对该组 50 张图像的每个灰度值对应的像素点个数取平均,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} 。将灰度值大于 i 的相对亮度相加,得到灰度值大于 i 的光强分布总值为

$$S(i) = \sum_{k=i}^{255} L_k, \quad (4)$$

式中 $S(i)$ 为 Clidar 探测回波信号后提取的光强分布总值, $S(0), S(20), S(40), S(60), S(80)$ 分别为 $i=0, 20, 40, 60, 80$ 时的光强分布总值。

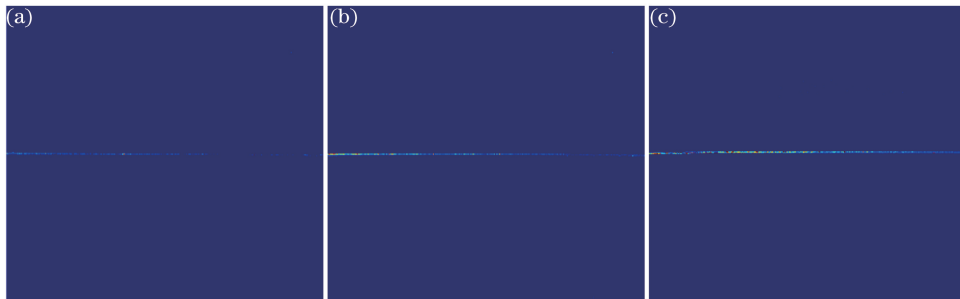


图 2 不同 PM2.5 浓度下的回波信号伪彩图。(a) 低浓度; (b) 正常浓度; (c) 高浓度

Fig. 2 Echo signal pseudo color images under different PM2.5 concentrations.

(a) Low concentration; (b) normal concentration; (c) high concentration

为了寻找 $S(i)$ 与大气中 PM2.5 浓度的具体关系,将 CCD 在不同增益条件下提取的 $S(i)$ 值与实测的 PM2.5 浓度值进行线性拟合。图 3(a)~(e)分别为 CCD 在低增益和高增益下, Clidar 系统中 $S(i)$ ($i=0, 20, 40, 60, 80$) 反演的 PM2.5 浓度值与 BAM-1020 颗粒物监测仪实测的 PM2.5 浓度值之间的数据点对比图,横坐标为 BAM-1020 颗粒物监测仪实测的 PM2.5 浓度值,纵坐标为 Clidar 反演的 PM2.5 浓度值,红色圆形数据点和蓝色三角形数据点分别为 CCD 在低增益和高增益下 Clidar 反演的 PM2.5 浓度值数据点。红色直线为 $y=x$, 将其作为标准参考值,横坐标为 BAM-1020 颗粒物监测仪实测的 PM2.5 浓度值。Clidar 反演的 PM2.5 浓度值是由 CCD 捕捉侧向散射回波信号图后利用(4)式提取的 $S(i)$ 再通过经验公式 $N=[S(i)-b]/k$ 计算得到的。经验公式 $S(i)$ ($i=0, 20, 40, 60, 80$) 对应的参数 k, b 的值如表 2 所示, N 为 Clidar 系统反演的 PM2.5 浓度值,单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

以平均误差、残差方差和综合偏差率统计量角度对 Clidar 系统反演 PM2.5 浓度值的测量误差进行分析。利用残差,即各点实际值与预测值(通过直线函数计算所得)的差值,求出各个残差的平均值,将该平均值作为平均误差。残差方差,即残差的平方和除以残差个数与 1 的差值。综合偏差率,即各数据点偏差率的平均值,可反映 CCD 在不同增益下 $S(i)$ ($i=0, 20, 40, 60, 80$) 的反演精度^[17],分析结果如表 2 所示。表 2 给出了 CCD 在低增益和高增益下的反演结果。 $S(0), S(20), S(40), S(60), S(80)$ 在低增益和高增益下对应的平均误差分别为 4.45, 5.40, 7.54, 8.29, 8.46 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 3.30, 2.97, 3.25, 3.84, 5.05 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 残差方差分别为 28.59, 38.90, 72.44, 89.22, 98.24 和 19.77, 14.21, 16.37, 22.45, 40.08, 综合偏差率分别为 13.24%, 16.23%, 22.33%, 24.12%, 24.28% 和 9.76%, 9.63%, 10.59%, 12.54%, 16.16%。从表 2 可以看出, CCD 在高增益下各个预测模型反演值的平均误差、残差方差和综合偏差率都小于低增益下相同预测模型下的平均误差、残差方差和综合偏差率,因此 CCD 在高增益下预测模型的反演精度更高。对于图 3(c)~(e), 在反演

较高浓度 PM2.5 时,获取的回波信号图中存在大量低于 40,60,80 的灰度值,因此 Clidar 系统中 S(40), S(60)和S(80)反演得到的 PM2.5 浓度偏差较大。对于图 3(a),尽管使用了干涉滤光片来减小背景噪声,但是暗电流、热噪声及激光线宽等造成的系统误差不可避免,S(0)预测模型的平均误差及综合偏差率较小而残差方差较大,所以 S(0)预测模型的反演值偶然性误差较大。对比表 2 可得,CCD 在高增益下 $i=20$ 时预测模型反演值的平均误差、残差方差和综合偏差率最小,因此 CCD 在高增益下 S(20)预测模型反演 PM2.5 浓度值的精度最高,实际情况下取 CCD 在高增益下 S(20)预测模型的经验公式进行反演,结果最为准确。

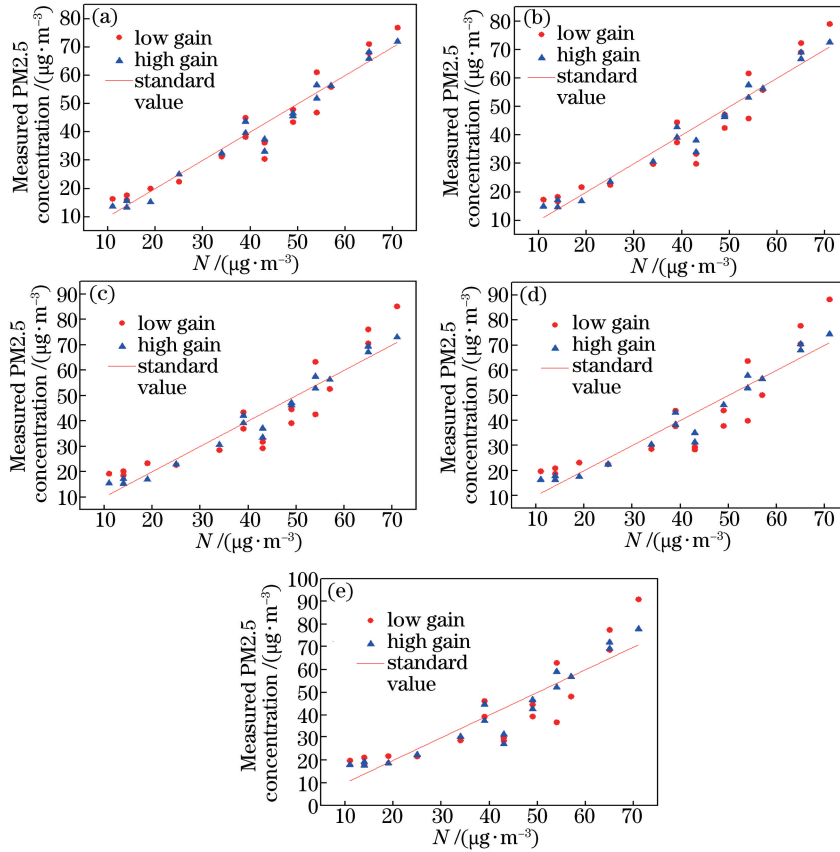


图 3 高、低增益下 S(i)模型的 PM2.5 浓度反演值与实测 PM2.5 浓度值对比图。

(a) $i=0$; (b) $i=20$; (c) $i=40$; (d) $i=60$; (e) $i=80$

Fig. 3 Comparison of PM2.5 concentration derived from S(i) model with high gain and low gain and measured PM2.5 concentration. (a) $i=0$; (b) $i=20$; (c) $i=40$; (d) $i=60$; (e) $i=80$

表 2 高、低增益下 5 种预测模型的参量

Table 2 Parameters of five models under high gain and low gain

Condition	Low gain					High gain				
	S(0)	S(20)	S(40)	S(60)	S(80)	S(0)	S(20)	S(40)	S(60)	S(80)
Empirical formula parameter	$k=1086, b=1635$	$k=1022, b=-4777$	$k=657, b=-4208$	$k=442, b=-1515$	$k=247, b=1274$	$k=2770, b=39443$	$k=2871, b=23419$	$k=2927, b=-1921$	$k=2801, b=-19350$	$k=2393, b=-21193$
Average error / ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	4.45	5.40	7.54	8.29	8.46	3.30	2.97	3.25	3.84	5.05
Residual variance	28.59	3890	72.44	89.22	98.24	19.77	14.21	16.37	22.45	40.08
Comprehensive deviation rate / %	13.24	16.23	22.33	24.12	24.28	9.76	9.63	10.59	12.54	16.16

4 结 论

通过 Clidar 系统观测大气颗粒物,获得了 CCD 观测图像,提取出灰度值矩阵,拟合 CCD 在高、低增益下获取的回波信号图光强分布总值与 PM_{2.5} 浓度的关系式,将根据经验公式反演的 PM_{2.5} 颗粒物浓度值与 BAM-1020 颗粒物监测仪实测的颗粒物浓度值进行对比,比较 CCD 在不同增益下不同预测模型的平均误差、残差方差和综合偏差率,并得出以下结论:CCD 在高增益下预测模型的反演精度高于低增益下预测模型的反演精度;CCD 在高增益下,S(20)预测模型的反演 PM_{2.5} 浓度值的精度最高。

参 考 文 献

- [1] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.
石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.
- [2] Shi Bo, Tao Zongming, Ma Xiaomin, *et al.* Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501006.
史博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501006.
- [3] Meki K, Yamaguchi K, Li X, *et al.* Range-resolved bistatic imaging lidar for the measurement of the lower atmosphere [J]. Optics Letters, 1996, 21(17): 1318-1320.
- [4] Tao Zongming, Shan Huihui, Ma Xiaomin, *et al.* Retrieval method of PM_{2.5} mass concentration profile in near-ground and case study[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110102.
陶宗明, 单会会, 麻晓敏, 等. 近地面 PM_{2.5} 质量浓度廓线反演方法及个例研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110102.
- [5] Tao Z M, Liu D, Wang Z Z, *et al.* Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1127-1134.
- [6] Barnes J E, Bronner S, Beck R, *et al.* Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. Applied Optics, 2003, 42(15): 2647-2652.
- [7] Barnes J E, Sharma N C P, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system[J]. Applied Optics, 2007, 46(15): 2922-2929.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Hu Miao, Wu Duanfa, Li Qiliang, *et al.* Measurement of PM_{2.5} concentration based on the CCD side-scattering lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1101002.
胡淼, 吴端法, 李齐良, 等. 基于 CCD 侧向散射激光雷达的 PM_{2.5} 浓度测量研究[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1101002.
- [13] 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.
- [14] Ma Xiaomin, Shi Bo, Shan Huihui, *et al.* Geometric calibration method of side-scatter lidar based on charge-coupled device[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0201002.

- 麻晓敏, 史博, 单会会, 等. 基于 CCD 成像的侧向散射激光雷达几何标定方法[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0201002.
- [15] Fan Xuebo, Liu Wei, Wang Guanghua, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ in Hangzhou[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.
- [16] Tao Z M, Liu D, Xie C B, *et al.* A numerical inversion method for CCD side-scatter lidar[C]. International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2013: 350-352.
- [17] 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.