

双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污染及其输送研究

范广强 刘建国 张天舒 董云升 赵雪松 谢品华 刘文清

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

摘要 介绍了双通道偏振激光雷达的特征及主要参数和数据处理方法, 并利用该系统对上海世博会开幕式前后的沙尘暴污染过程展开研究, 对测量结果进行了分析。结果表明, 沙尘暴污染是由西北方向输送, 由后向轨迹分析其来源是蒙古地区, 并有间歇期, 形成了二次沙尘输入过程; 沙尘暴后 5 月份主要风向转为东北风, 有利于沙尘污染颗粒物消除。此外将偏振激光雷达测量颗粒物消光系数与地面 PM₁₀ 空气污染指数(API) 对比分析, 结果显示两者有很好的—致性。

关键词 测量; 偏振激光雷达; 沙尘污染; 消光系数; 退偏振度比

中图分类号 P412.25 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s114006

Dual-Channel Polarization Lidar Monitoring of Sandstorm and Its Transportation Research

Fan Guangqiang Liu Jianguo Zhang Tianshu Dong Yunsheng Zhao Xuesong
Xie Pinhua Liu Wenqing

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

Abstract The characteristic, the main parameters and the data processing solution of two-wavelength polarization lidar are introduced. The sand pollution transportation process before and after the opening ceremony for the Shanghai World Expo is studied. The results show that the sandstorm was transported from northwest, by backward trajectories analysis the sandstorm came from the Inner Mongolia region. The sandstorm ceased and formed again in the sandstorm transportation. After sandstorm, the main wind direction changed into northeast, which was favorable for removing sand particle. The comparison between extinction coefficient by the polarization lidar measurement and the ground PM₁₀ air pollution index (API) is presented, which shows the satisfactory coherence of the different method-derived results.

Key words measurement; polarization lidar; sandstorm pollution; extinction coefficient; polarization ratio

OCIS codes 290.2200; 290.1090; 280.3640; 280.1100; 280.1120

1 引 言

近年来我国西北部沙尘暴天气频现, 并且其沙尘颗粒物通过长距离输送严重影响了上海的大气环境。沙尘污染混有大量的沙尘颗粒物、花粉、细菌以及有害矿物质成分, 沙尘污染发生时, 空气能见度大为降低, 其引起的空气污染可诱发、加重、导致呼吸道细菌感染, 严重影响了人类健康。沙尘颗粒物输

送过程中不仅输送大量的颗粒物, 并且伴随输入周围区域的气体污染物, 加剧了城市二次污染物的生成。沙尘污染直接和间接带来的危害越来越让政府和人们关注, 引起政府和人们的重视^[1]。

偏振激光雷达可以通过气溶胶颗粒物退偏振度比的测量确定颗粒物的形状特征, 进而对颗粒物进行分类, 成为研究粒子形态的一种有效探测工具, 在大

收稿日期: 2011-08-02; **收到修改稿日期:** 2011-09-13

基金项目: 上海市环境保护局资助项目(沪环科 2010-03)和青年人才专项基金(y03rc11122)资助课题。

作者简介: 范广强(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: gqfan@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事环境污染光学监测新技术、目标散射性及遥感监测技术等方面的研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

气气溶胶、沙尘、云等方面有着广泛应用。S. R. Pal 等^[2]利用偏振激光雷达测量研究了云层的偏振特性。N. Sugimoto 等^[3]采用双波长(532 nm/1064 nm)偏振激光雷达测量并研究了沙尘气溶胶的特性。Tetsu Sakai 等^[4]在实验仓内测量了对流层气溶胶颗粒物主要类型如矿物质沙尘颗粒、海盐颗粒、氨硫酸盐等后向线性偏振比,这为偏振激光雷达测量对流层气溶胶成分提供了参考。国内学者在研究热点上也作出了不少研究,如中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研制了双通道偏振激光雷达,并在北京奥运会、上海世博会、广州亚运会环境保护工作中发挥了重要作用。

上海世博会期间,5月份有3次较为严重的沙尘污染过程。本文针对其污染过程,采用偏振激光雷达数据进行分析,讨论了颗粒物消光系数与退偏振度比时空分布,并对其后向轨迹进行分析;对沙尘污染过程的颗粒物通量进行了估算,并分析了沙尘污染过程对地面PM₁₀空气污染指数(API)的影响。

2 偏振激光雷达系统

实验采用的偏振激光雷达系统是中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研制开发的,其结构图如图1所示,系统主要由光学发射单元、光学接收单元和信号采集单元3部分组成,详细参数如表1所示。光学发射单元由Nd:YAG激光器和扩束镜组成,采用Nd:YAG二倍频532 nm输出波长作为光源,其单脉冲能量为20 mJ,重复频率为20 Hz;激光经扩束镜与发射镜发射到大气中与气溶胶颗粒物及大气分子相互作用。光学接收单元主要包括卡塞格林型望远镜、小孔光阑、窄带滤光片和光电倍增管。后向回波信号经望远镜接收后,进入放在焦平面上的视场光

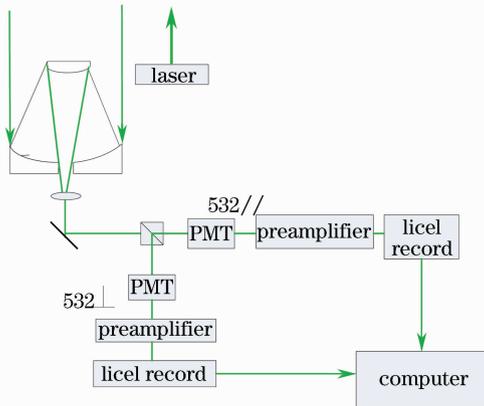


图1 偏振激光雷达结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarization lidar

阑,经准直系统后,波长532 nm的回波信号通过尼科尔棱镜后分为两束线偏振光经窄带滤光片后分别被相应的光电倍增管接收并转化为电流信号。信号采集单元主要包括前置放大器、Licel记录仪、计算机。光电倍增管转化的电流信号经前置放大器放大并转换为电压信号后被Licel记录仪采集,由计算机保存采集数据和显示采集原始信号波形。

表1 偏振激光雷达的主要技术参数

Table 1 Main instrument characteristics of the polarization lidar

Nd:YAG laser	
Wavelength /nm	532
Energy /mJ	30
Frequency /Hz	20
Receiving optics	
Telescope	Cassegrain
Telescope diameter /mm	200
Field of view /mrad	2
Filter bandwidth /nm	3
Data acquisition and processing	
Digital card	Licel record

3 数据处理方法

3.1 退偏振度比和消光系数处理方法

利用偏振激光雷达技术探测大气颗粒物时,激光雷达表达式为^[5]

$$P_p(r) = P_t k_p r^{-2} \beta_p(r) \exp\left[-2 \int_0^r \alpha_p(r') dr'\right], \quad (1)$$

$$P_{rs}(r) = P_t k_s r^{-2} \beta_s(r) \exp\left\{-\int_0^r [\alpha_p(r') + \alpha_s(r')] dr'\right\}, \quad (2)$$

下标p和s分别表示与发射激光偏振方向平行和垂直的两个方向, P_t 为激光发射功率, $P_p(r)$ 和 $P_{rs}(r)$ 分别为激光雷达接收到的在距离r处大气后向散射平行分量和垂直分量的回波功率, k_p 和 k_s 分别是接收平行分量通道和垂直分量通道的雷达系统常数, $\beta_p(r)$ 和 $\beta_s(r)$ 分别表示在距离r处大气后向散射系数的平行分量和垂直分量, $\alpha_p(r)$ 和 $\alpha_s(r)$ 分别表示在距离r处大气消光系数的平行分量和垂直分量。

偏振激光雷达探测的退偏振度比 $\delta(r)$ 可表示为

$$\delta(r) = \frac{P_{rs}(r)/k_s}{P_p(r)/k_p} = \frac{\beta_s(r)}{\beta_p(r)} \exp\left\{\int_0^r [\alpha_p(r') - \alpha_s(r')] dr'\right\}, \quad (3)$$

一般情况下, $\alpha_p(r) = \alpha_s(r)$, (3)式可表示为

$$\delta(r) = \frac{\beta_s(r)}{\beta_p(r)} = k \frac{P_{rs}(r)}{P_{rp}(r)}, \quad (4)$$

式中 $k = k_p/k_s$ ，被称为通道的增益比。通过检测雷达增益比的数值，采集得到的后向回波信号的平行分量和垂直分量，可以获得大气退偏振度比的垂直廓线。

对回波信号的平行分量进行 Fernald 积分法^[6]反演可得到颗粒物的消光系数。反演时，由于气溶胶类型主要为沙尘颗粒物，因此将气溶胶的消光后向散射比设为 20.4 sr。大气分子的消光后向散射比为 $8\pi/3$ sr。大气分子的消光系数采用美国标准大气模式，并利用分子瑞利散射理论计算得到。

3.2 颗粒物通量的估算

研究表明，颗粒物消光系数与 PM_{10} 质量浓度是相关的^[7]。通过同时获取颗粒物 PM_{10} 质量浓度和消光系数，建立经验关系式。假设观测区域内气溶胶模式不变，由于偏振激光雷达给出了垂直地面方向上的颗粒物消光系数，通过该经验关系式，可以反演出颗粒物质量浓度 $C_{PM_{10}}(z)$ 的垂直分布。

风廓线雷达给出了不同高度风场的变化，使用风廓线雷达获得风场矢量数据 \mathbf{V} ；将风场矢量数据与输送通道方向矢量 \mathbf{r} 进行矢量相乘， \mathbf{r} 矢量方向为偏振激光雷达向世博园区的方向。将上述乘积结果乘以 PM_{10} 质量浓度可获得不同高度的颗粒物 PM_{10} 输送通量 $D_{flux}(z)$ 。

$$D_{flux}(z) = C_{PM_{10}}(z) \times (\mathbf{V} \cdot \mathbf{r}), \quad (5)$$

$D_{flux}(z)$ 值为正时，表示颗粒物沿输送通道输入， $D_{flux}(z)$ 为负时，表示颗粒物沿输送通道输出。由于颗粒物输送受很多因素影响，所以对输送通量的计算属于半定量化的估算。

4 激光雷达实验结果与分析

如图 2 中 A 所示，世博会期间，偏振激光雷达安装在宝山区环境监测站楼顶，安装高度约在 20 m，宝山市区在其东北部，其北部和南部为宝山钢铁工业区，周围交通较为繁忙。偏振激光雷达时间分辨率设置为 5 min，每个周期工作时间为 1 min，发射 1200 发脉冲，休息时间 4 min，完成一组数据采集。该系统的空间分辨率为 7.5 m。

偏振激光雷达通过同时探测颗粒物的消光系数和退偏振度比得到颗粒物浓度分布和形状规则的信息。沙尘输送会导致空气中的颗粒物浓度急剧增加，消光系数增大，同时输入的颗粒物形状很不规则，退偏振度比大于 0.1，区别于背景气溶胶和局地



图 2 偏振激光雷达安装位置

产生的气溶胶颗粒。正是因为这些特征通过偏振激光雷达可以反演出沙尘污染输送的信息。上海世博会在 2010 年 5 月~10 月期间举办，期间共有 3 次沙尘污染过程，均发生在 5 月份，其主要分布在 1~4 km 高度范围内，中间过程伴有沉降并受气象因素影响，由后向轨迹分析其来源是蒙古地区。

4.1 偏振激光雷达测量沙尘时空分布及后向轨迹分析

偏振激光雷达垂直通道接收到的信号比较弱，由于白天背景噪声影响，探测高度只能达到 4 km，晚间背景噪声减弱，探测高度能达到 8 km。图 3 显示了世博会开幕式前后出现的一次严重的沙尘污染过程。此次沙尘污染过程分布范围大，持续时间长，根据其分布范围和强度主要分布分为 3 个阶段。4 月 26 日下午上海出现了一层稀薄的沙尘颗粒物，

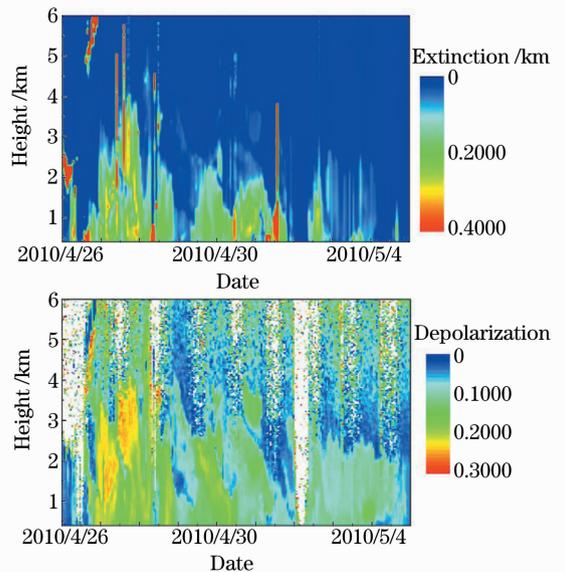


图 3 偏振激光雷达测量的消光系数和退偏振度比时间演化图

Fig. 3 Temporal variation of polarization ratio and extinction coefficient profile measured by the polarization lidar

大部分范围内颗粒物消光系数大于 0.2 km^{-1} , 退偏振度比大于 0.25; 4月27日零时开始, 沙尘颗粒物浓度增加, 分布高度扩展至近地面 4 km; 4月28日, 沙尘颗粒物浓度有所降低, 分布高度范围有所下降, 但沙尘浓度仍然很高; 29日 1:00 后, 由于沙尘颗粒的沉降, 没有外来输入, 空气比较干净, 空中的颗粒物消光系数小于 0.1 km^{-1} , 退偏振对比小于 0.1。第一阶段沙尘输入过程结束。4月29日 19:00 后输入沙尘颗粒, 颗粒物消光系数大于 0.2 km^{-1} , 分布高度在 3 km 以下, 较上次输入颗粒物浓度有所下降, 并且颗粒物退偏振度比有所降低, 退偏振对比主要分布在 0.1~0.2 范围内, 说明输入的沙尘中圆形颗粒物增多, 细小颗粒增多。此次沙尘颗粒物输入过程一直持续到 5月1日下午, 5月1日下午颗粒物主要分布在 1.5km, 并且消光系数增大, 峰值消光

系数达到了 0.4 km^{-1} 以上, 退偏振度比小, 主要分布在 0.1 以下, 可见沙尘颗粒物沉降至地面, 空中的颗粒物主要表现为球形小粒子特征。第二阶段沙尘输入过程结束。第三阶段为 5月1日下午~5月4日, 主要表现为微弱的外部输入和扬尘颗粒物。沙尘颗粒物浓度低, 并且逐日减弱。

图 4 所示为对 PM_{10} 颗粒物输送通量的反演结果, 从图中可以看出沙尘输送期间, PM_{10} 颗粒物输送通量比较大, 尤其 4月27日~4月28日, 以及 4月30日~5月1日期间, 输送通量达到了 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上, 这两个时间段也分别对应了沙尘输入过程的两个阶段。4月27日~4月28日输送通道分布在 400~3200 m 以上高度内, 4月30日~5月1日输送通道分布在 400~2800 m 高度内, 输送通量减小。

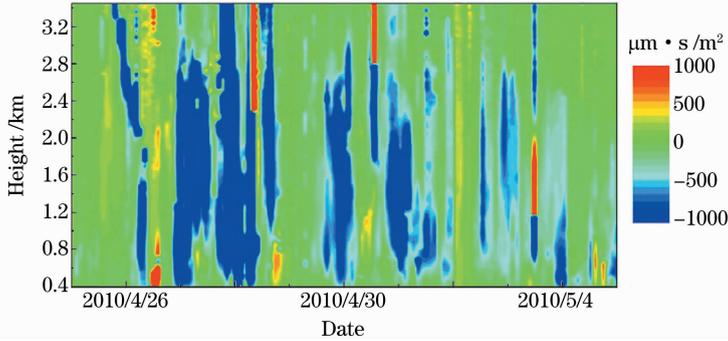


图 4 PM_{10} 颗粒物输送通量

Fig. 4 Transportation flux of the PM_{10} particle

为了判断其来源, 针对世博会前后沙尘污染事件 3 个阶段, 利用 NOAA 提供的 Hysplit 模型^[8]对沙尘颗粒物进行了后向轨迹分析, 分别选择了 0.5, 2.5, 5 km 3 个高度。如图所示, 4月26日, 0.5, 2.5, 5 km 层的颗粒物沿着西北方向到达上海上空; 4月30日, 2.5 km 和 5 km 高度颗粒物沿西北方向到达上海上空, 而 0.5 km 层颗粒物来自于东北方

向(海上), 地面层东北风有利于沙尘颗粒物的消除; 5月3日, 0.5 km 和 2.5 km 高度颗粒物分别来自于东北方向, 利于消除污染, 而 5 km 高度颗粒物来自于东南方向。

4.2 沙尘输入对地面 API 指数的影响

API 就是将常规监测的几种空气污染物浓度简化称为单一的概念性指数数值形式, 并分级表征空气污

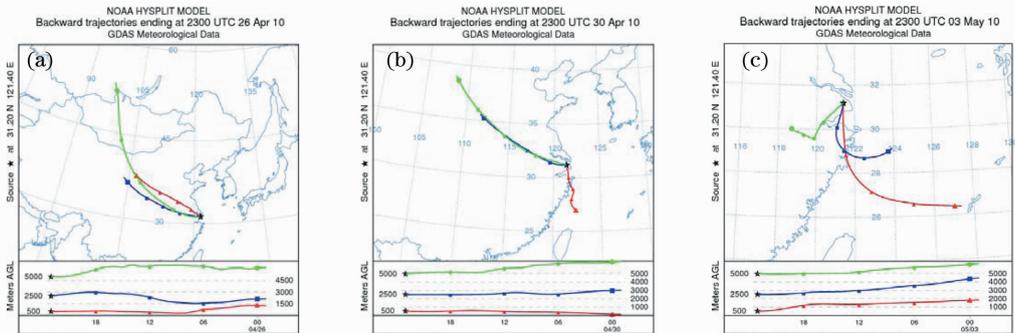


图 5 颗粒物后向轨迹分析

Fig. 5 Backward trajectories of the particle

染程度和空气质量状况,适合表示城市的短期空气质量状况和变化趋势。以 PM_{10} API为例研究沙尘污染过程对上海地面空气质量的影响。图6显示,4月26日上海上空出现沙尘颗粒物,颗粒物沉降不多, PM_{10} API处于较低的水平;4月27日~4月28日,输入的沙尘颗粒物浓度增大,沉降增多, PM_{10} API随之急剧增高,随着4月29日输入沙尘颗粒物浓度的减弱, PM_{10} API也逐渐降低;4月30日第二阶段的沙尘颗粒物的输入,致使 PM_{10} API略有升高;进入5月份,上海风向来自于海上清洁的东北风为主,有利于沙尘颗粒物的清除, PM_{10} API也逐渐下降。由图3和图6可以看出,偏振激光雷达测量的消光系数和 PM_{10} API有着很好的一致性。

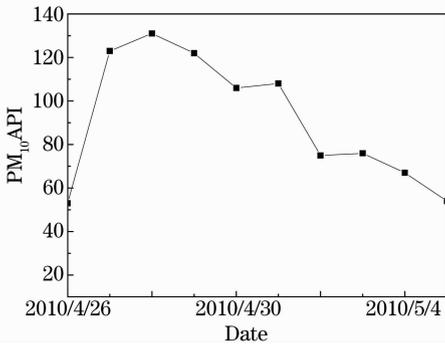


图6 PM_{10} API 空气污染指数随时间的变化

Fig. 6 Temporal variation of PM_{10} API

5 结 论

利用偏振激光雷达系统在上海世博会期间进行了长时间连续自动观测,采用观测数据对世博会开幕式前后一次较为严重的沙尘输入现象展开讨论。主要结论为:

1) 此次沙尘为西北方向输入上海的,并有间歇期,形成了2个阶段的沙尘输入过程;5月份主要风向转为东北风,有利于沙尘污染颗粒物消除。

2) 偏振激光雷达测量沙尘颗粒物消光系数与地面 PM_{10} API对比分析表明,两者有很好的 consistency。

参 考 文 献

- 1 Du Wupeng, Gao Qingxian, Wang Yuesi *et al.*. Influence of dust storms on urban atmospheric environmental quality in northern China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(9): 1021~1026
- 杜昊鹏, 高庆先, 王跃思 等. 沙尘天气对我国北方城市大气环境质量的影响[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(9): 1021~1026
- 2 S. R. Pal, A. I. Carswell. Polarization properties of lidar backscattering from clouds[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(7): 1530~1535
- 3 N. Sugimoto, C. H. Lee. Characteristic of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(28): 7468~7474
- 4 Tetsu Sakai, Tomohiro Nagai, Yuji Zaizen *et al.*. Backscattering linear depolarization ratio measurements of mineral, sea-salt, and ammonium sulfate particles simulated in a laboratory chamber [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(23): 4441~4449
- 5 Svetlana V. Samoilova, Yurii S. Balin, Margarita M. Krekova *et al.*. Method for reconstructing atmospheric optical parameters from the data of polarization lidar sensing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(7): 3499~3509
- 6 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 7 Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo *et al.*. Aerosol pollutant boundary layer measured by lidar at Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 59~66
- 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]. *大气科学环境研究*, 2004, **17**(1): 59~66
- 8 HYSPLIT data[OL]. <http://ready.arl.noaa.gov/hysplit.php>

栏目编辑: 李文喆