

文章编号 1004-924X(2017)07-1697-08

微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布

鲁先洋^{1,2}, 李学彬^{1*}, 秦武斌^{1,2}, 崔生成¹, 刘庆¹, 徐青山¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所

中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031;

2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽合肥 230031)

摘要:城市近地面气溶胶的分布随时空快速变化,常用的地基定点监测只能获取区域内有限位置的气溶胶质量浓度,大致反映区域内气溶胶的分布情况。为确定气溶胶和污染物在城市近地面水平路径上的分布情况,利用微脉冲激光雷达(MPL)、粒子计数器、能见度仪和颗粒物质量浓度监测仪获得的气溶胶数据,根据 Mie 散射理论建立了气溶胶消光系数、粒子谱分布和质量浓度等参数的数学模型,反演得到了水平路径上的气溶胶质量浓度分布。该方法可以以测量点为中心进行 0~6 km 的 360° 的水平扫描,具有监测范围大、分辨率高的优点。最后开展了气溶胶水平分布的实际测量,获得了距离 6 km 长的水平路径上近地面气溶胶质量浓度的实时分布。这为研究城市气溶胶的污染来源和动态变化提供了有效的数据支持。

关键词:大气光学;气溶胶探测;激光雷达;空气污染监测;质量浓度

中图分类号: TN958.98; X831 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1697

Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar

LU Xian-yang^{1,2}, LI Xue-bin^{1*}, QIN Wu-bin^{1,2}, CUI Sheng-cheng¹, LIU Qing¹, XU Qing-shan¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation,
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Science Island Branch of Graduate School,
University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: xbli@aiofm.ac.cn

Abstract: The distribution of aerosol over urban area is rapidly changed with space and time, thus common ground-based fixed-point monitoring can only obtain the mass concentration of aerosol on measuring points within the region, which roughly reflects the distribution of aerosol in the region. In order to determine the horizontal distribution of aerosol and pollutants over the urban area, based on the data obtained by Micro Pulse Lidar (MPL), particle counter, visiometer and particle mass concentration detector, a mathematical model in terms of aerosol extinction coefficient, particle spectrum distribution, mass concentration was established according to Mie scattering theory, inverting the horizontal distribution of aerosol mass concentration. Taking the measurement points as the center, the method can implement 360° horizontal scanning over 6 km, which exhibits large

收稿日期: 2017-03-21; 修订日期: 2017-04-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41205010, No. 41305019)

monitoring scope and high resolution. Furthermore, the horizontal distribution of aerosol was measured experimentally, obtaining the real-time distribution of aerosol mass concentration over 6 km on the horizontal path. It provides effective data supports for the research of pollution sources and dynamic changes of aerosol in urban regions.

Key words: atmospheric optics; aerosol detection; micro pluse lidar; air pollution monitoring; mass concentration

1 引言

气溶胶是悬浮在大气中的固体或液体小颗粒,它通过吸收和散射太阳辐射以及作为云凝结核参与云的形成,直接或间接地影响天气系统的辐射平衡和气候变化^[1]。在我国城市化进程中,随着城市规模的扩张和城市人口的增加,导致由汽车尾气、地表扬尘、工业废气排放等造成空气中气溶胶粒子急剧增加,大气污染问题日益突出。可吸入颗粒物 PM₁₀ 一直是城市大气污染物的主要来源,而细粒子 PM_{2.5} 则在大气能见度和人体健康方面的影响更加显著^[2-3]。从环境监测的实际需求来看,实时监测城市近地面气溶胶日益受到人们的关注^[4],相应地开展了气溶胶质量浓度监测手段和方法的研究^[5]。目前,利用分布在城市固定点的气溶胶质量浓度监测仪器,可获得近地面有限位置气溶胶的水平分布情况,然而城市区域内近地面气溶胶的来源途径多、分布变化快、区域差异大,有限位置的监测数据不能全面反映区域内的气溶胶分布。

激光雷达能进行大范围、高频次的探测,是反演气溶胶质量浓度分布的有效手段。陶宗明等^[6]利用侧向散射激光雷达反演了合肥西郊 PM_{2.5} 质量浓度的垂直分布廓线。韩道文等^[7]利用激光雷达反演气溶胶质量浓度的空间垂直分布,获得了气溶胶的垂直分布廓线。Youngmin Noh 等^[8]利用拉曼激光雷达反演了亚洲灰尘质量浓度的垂直分布, J. C. Raut^[9]等利用激光雷达反演了巴黎地铁站内气溶胶质量浓度的时空分布特征。本文利用微脉冲激光雷达探测到的水平数据,结合粒子计数器和能见度仪测量数据,计算出城市近地面气溶胶的水平路径分布。与有限的地基定点监测相比,该方法具有监测范围大、分辨率高等优点,还可以对特定区域进行平面扫描监测,获得近地面气溶胶的面分布信息,进而可以分析污染源的分布特征、时空

变化信息和输送路径,为城市气溶胶污染的防控提供有效的数据支持,具有较高的应用价值。

2 测量设备

2015 年 11 月至 12 月期间,本课题组在中科院安徽光机所大气光学中心对近地面大气气溶胶进行了测量。主要的测量仪器有微脉冲激光雷达、多道光学粒子计数器、能见度仪和颗粒物质量浓度监测仪。

2.1 微脉冲激光雷达

透射式同轴结构微脉冲激光雷达(MPL-A1, 安徽光学精密机械研究所研制)^[10]由激光发射单元(高重复率 Nd:YAG 固体激光器)、信号接收单元(接收的回波信号为气溶胶对激光的 Mie 后向散射)和信号处理单元构成。该型激光雷达的特点是探测没有盲区,重叠过渡区的范围较小,其技术参数和性能指标如表 1 所示。

表 1 微脉冲激光雷达的技术参数和性能指标

Tab. 1 Technique parameters and performance of micro pluse lidar

System parameters	Value
Wavelength/nm	532
Output energy/ μ J	10
Repetition rate/Hz	2 500
Beam divergence/ μ rad	50
Pulse duration/ns	10
Receiver telescope diameter/mm	150
Field of receiver view/ μ rad	200
Filter bandwidth/nm	0.3
Detector	PMT
Resolution/m	30

在大气水平均一的假设条件下,水平方向上的激光雷达方程可简化为^[11]:

$$P(R) = CR^{-2}\beta\exp(-2\alpha R), \quad (1)$$

式中: $P(R)$ 是回波功率, C 是激光雷达常数, β 是大气水平后向散射系数, α 是大气水平消光系数。

2.2 能见度仪

能见度仪(FD12 U21208, 芬兰 Vaisala 公司)由发射器、接收器和控制单元组成。发射器以 LED 为光源, 发出近红外光, 经气溶胶粒子散射后, 前向散射光进入接收器。根据粒子的前向散射特性, 仪器直接测量出气象光学视距 (Meterological Optical Range, MOR)。MOR 与消光系数的关系为^[12]:

$$MOR = -\ln(\epsilon)/\sigma, \quad (2)$$

表 2 OPC-06 多道光学粒子计数器的名义分档半径

Tab. 2 Radius grading of OPC-06 multi-channel optical particle counter

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Radius/ μm	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00	6.00

2.4 颗粒物质量浓度监测仪

TEOM1405 监测仪由样品切割头部件和 TEOM1405 单元两个主要部分组成。TEOM 仪器是唯一基于滤膜实时测量悬浮于气流中的颗粒物质量浓度的监测仪, 称重原理为锥形元件震荡微天平法。锥形元件的一端固定有可更换的滤膜, 气溶胶粒子沉降在滤膜上。通过检测锥形元件震荡频率的变化测量颗粒的物质质量浓度。其定量关系为:

$$\Delta m = K_0 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right), \quad (3)$$

式中: Δm 为滤膜质量变化, K_0 为弹性系数, f_0 为初始频率, f_1 为最终频率。TEOM1405 监测仪的测量范围为 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 至几个 g/m^3 , 仪器可提供 1, 8, 12, 24 h 的质量浓度平均值。

3 理论分析

根据 Mie 散射理论, t 时刻气溶胶粒子的消光系数为:

$$\alpha_c^\lambda(t) = \pi \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) \frac{dN}{dr}(t) r^2 dr, \quad (4)$$

式中: Q_{ext} 为消光效率因子, 是折射率 m 、粒子半径 r 和波长 λ 的函数; $\frac{dN}{dr}(t)$ 为粒子谱分布。质量消光系数是指单位质量粒子总的消光截面之和。假设不同粒径气溶胶粒子的密度相同, 都为 ρ , 则质

式中: ϵ 为识别目标的对比阈值, 取为 0.05; σ 为气溶胶消光系数。

2.3 光学粒子计数器

OPC-06 多道光学粒子计数器^[13]由光电测量系统和数据处理系统两部分组成。利用粒子对光的单次散射性质来测量粒子的数密度谱和数浓度。气溶胶粒子通过散射腔时, 光电倍增管接收到散射信号并转换为电脉冲, 由脉冲的计数确定粒子的数浓度, 脉冲的幅值确定粒子的粒径。仪器将半径为 $0.15 \sim 6.0 \mu\text{m}$ 的粒子分成 17 档, 分档半径如表 2 所示。

量消光系数为:

$$\alpha_s^\lambda(t) = 0.75 \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) \frac{dN}{dr}(t) \frac{dr}{r\rho}. \quad (5)$$

则任一时刻气溶胶粒子的消光系数、质量消光系数和质量浓度的关系为:

$$\alpha_s^\lambda(t) = \alpha_c^\lambda(t) M(t). \quad (6)$$

对于封闭空间, 如矿井、地下停车场、地铁站等, 气溶胶粒子源比较稳定, 质量消光系数可认为不随时间改变。利用最小二乘法求得平均质量消光系数为:

$$\alpha_s^\lambda = \frac{\sum_t \left(\int \alpha_c^\lambda(t) \frac{dN}{dr}(t) dr \right)^2}{\sum_t \left(\int \alpha_c^\lambda(t) \frac{dN}{dr}(t) dr \right) \left(\int \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{dN}{dr}(t) dr \right)}. \quad (7)$$

把 α_s^λ 代入式 (6), 则只需测量任意时刻的消光系数, 就可以反演出对应的气溶胶质量浓度。

但在开放空间, 由于气溶胶粒子的来源途径多、分布变化快, 气溶胶粒子的密度和折射率指数一般都是随时间变化的。利用粒子源特性与粒子谱分布之间统计上的相关性, 假定气溶胶粒子的密度和折射率取某一定值, 引入等效参数 C , 则气溶胶的消光系数和质量浓度之间的关系可改写为^[5]:

$$\alpha_c^\lambda(t) = C(\nu(t)) \times M(t) \times \alpha_s^\lambda(t). \quad (8)$$

等效参数 C 与粒子谱分布有关, 粒子谱用 Junge 谱分布拟合时, 则 C 是 Junge 谱指数 ν 的函数。运用式 (8) 拟合 $C(\nu)$ 时, 气溶胶粒子的质

量浓度 M 由颗粒物质量浓度监测仪测量值 PM_{10} 代替。根据大气气溶胶物理和化学性质的一般分析和统计结果及合肥地区的实测数据^[14-15],其余参数取值为: $m=1.50-0.02i$ 、 $\rho=1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ 。利用光学粒子计数器和颗粒物质量浓度监测仪的数据,结合式(8)可拟合出 $C(\nu)$ 曲线。

最常用的利用激光雷达计算大气气溶胶水平消光系数的方法是斜率法。该方法认为大气

$$\alpha_a(R) = -\frac{S_1}{S_2}\alpha_m(R) + \frac{X(R)\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_R^{R_c}\alpha_m(r)dr\right]}{\frac{X(R_c)}{\alpha_a(R_c)+\frac{S_1}{S_2}\alpha_m(R_c)} + 2\int_R^{R_c}X(r)\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_r^{R_c}\alpha_m(r)dr\right]dR}, \quad (9)$$

式中: $\alpha_a(R)$ 和 $\alpha_m(R)$ 分别为 R 处的气溶胶和大气分子的消光系数; $\beta_a(R)$ 和 $\beta_m(R)$ 分别为 R 处的气溶胶和大气分子的后向散射系数; $X(R)=P(R)R^2$,为经过距离订正的回波强度; $S_1=\alpha_a(R)/\beta_a(R)$,为气溶胶粒子消光后向散射比; $S_2=\alpha_m(R)/\beta_m(R)$,为大气分子的消光后向散射比,取值为 $8\pi/3$; $\alpha_a(R_c)$ 和 $\alpha_m(R_c)$ 分别为参考点 R_c 处的气溶胶消光系数和大气分子消光系数。其中, S_1 与激光波长、气溶胶谱分布和折射指数等因素有关,一般在 $10\sim 100$,合肥地区气溶胶类型为内陆城市型气溶胶,根据Mie散射理论由气溶胶谱分布和它的折射率计算出消光后向散射比^[14],这里认为 S_1 在同一水平高度保持不变。此外,认为同一水平高度上 $\alpha_m(R)$ 是常数,其数值由美国标准大气模式给出。

运用Fernald方法计算水平方向的气溶胶消光系数廓线时,参考点的选取和气溶胶消光后向散射比的取值尤为重要。Fernald方法用于计算垂直廓线时,一般选择不含气溶胶的洁净层位置为参考点,然而水平探测时通常找不到满足此条件的参考点。这里选取回波信号中最均匀的一段用斜率法估算参考点的消光系数初值。

利用式(9)计算气溶胶消光系数的水平分布廓线,再结合式(8)反演出水平路径上的质量浓度分布。

4 实验测量和对比分析

2015年11月至12月在合肥市科学岛大气光学中心进行了大气气溶胶测量。使用光学粒子

和气溶胶分布是水平均一的^[16],这样可求出一段距离内的平均消光值。实际的城市近地面气溶胶受地面粒子源的影响很大,而城市工业生产、汽车尾气排放等产生的气溶胶粒子随时空快速变化,水平均一的假设不再适用。为反演水平路径上的气溶胶消光系数,这里运用Fernald方法处理微脉冲激光雷达的水平探测数据^[17-19]。通过Fernald后向积分计算水平大气气溶胶的消光系数,其公式为:

计数器、微脉冲激光雷达、能见度仪、温湿度测量仪和气溶胶质量浓度监测仪进行同步测量。微脉冲激光雷达放置在15 m高的楼顶平台,东南方向放置指向市区,传输路径经过一宽为3 km的湖面。光学粒子计数器和气溶胶质量浓度监测仪放置在激光雷达前向水平方向30 m处,能见度仪放置在激光雷达前120 m处。微脉冲激光雷达和能见度仪测量得到的气溶胶消光系数用于对比以及相关分析,以验证Fernald方法处理水平消光的可行性。

由光学粒子计数器测出粒子谱分布,拟合出的Junge指数 ν 如图1所示, ν 反映气溶胶污染源的变化。可以看出,11月21日至22日 ν 在2.1~2.5变化,12月1日至2日 ν 在3.0~3.3变化,12月11至12日 ν 值在2.5~2.8变化,长时间跨度该值变化明显,而日内的变化较小。所以在利用式(6)计算气溶胶质量浓度时,认为整个

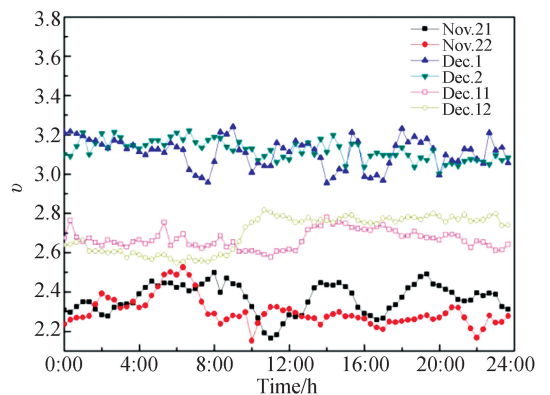


图1 Junge指数 ν 的变化

Fig. 1 Variation of Junge index ν

水平测量路径上 ν 是相同的,不会产生明显的偏差。

使用微脉冲激光雷达测量水平路径方向的回波功率,分析回波功率信号,发现 15~20 km 处信号基本不变。取该区间段信号的平均值作为背景光,修正回波功率信号,再根据激光雷达的几何重叠因子对 2 km 内的信号进行修正。在分析激光雷达数据时发现,在 $\ln(P(R)R^2) \sim R$ 图像中,5.5~6.5 km 图形连续且近似均匀分布在一条斜线上,说明该段气溶胶分布较为均匀,利用分段斜率法求得该段的平均消光系数作为参考点 6 km 处的消光系数,再根据式(7)反演出水平路径上气溶胶的消光廓线。图 2 是 12 月 11 日 5 点、8 点、11 点和 14 点的水平消光廓线。消光系数随时间和空间变化显著,中午相对于早晨,在大部分路径上消光增大;随着距离的增加,消光系数整体上都减小的趋势,14 点时消光系数随路径的波动更为明显。

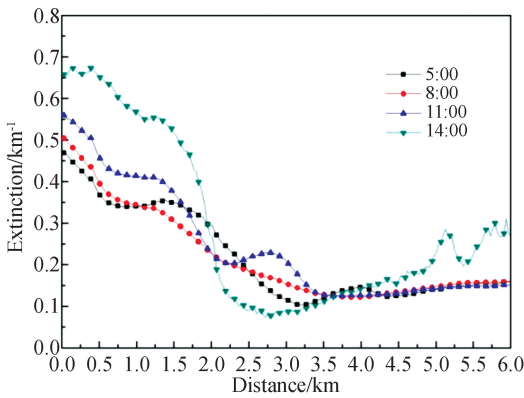
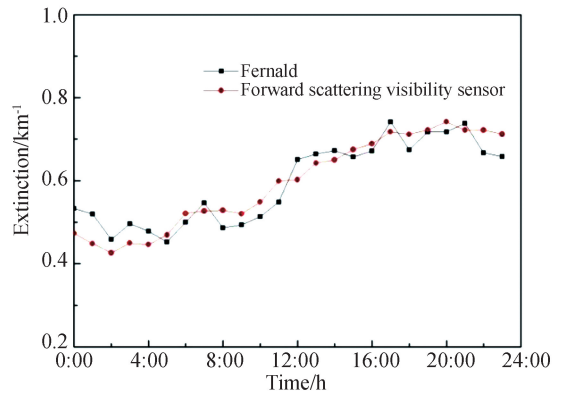


图 2 四个时刻的水平消光廓线

Fig. 2 Aerosol horizontal extinction profiles of four time points

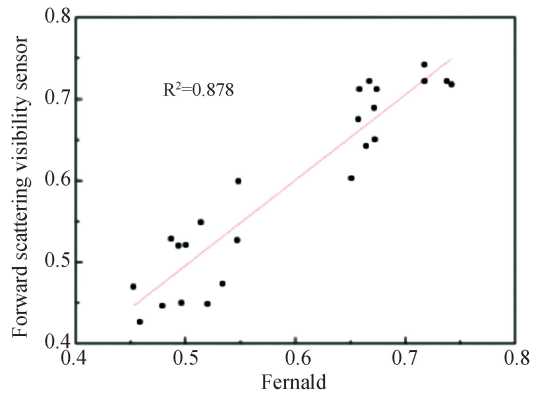
图 3 是 2015 年 12 月 11 日用前向散射能见度仪测量的消光系数小时均值与 Fernald 后向反演算法计算得到距离雷达前 120 m 处消光系数小时均值的比较。结果显示, Fernald 反演值与前向散射能见度仪测量值的变化趋势具有一致性,二者的相关性达到 87.8%。由此可见, Fernald 后向积分算法反演的气溶胶水平消光廓线是可信的。

利用式(5)和式(6)反演出 12 月 11 日激光雷达前 120 m 处质量浓度的小时均值,并与气溶胶



(a) 消光系数

(a) Extinction

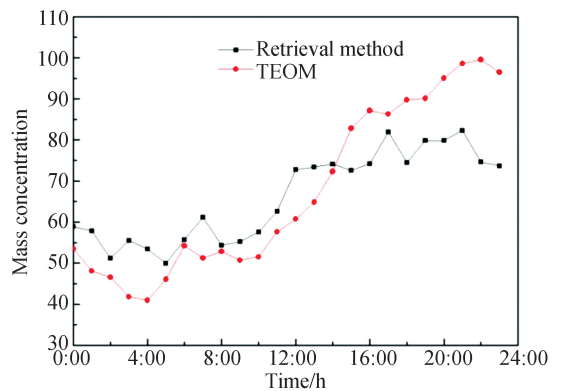


(b) 相关性分析

(b) Correlation analysis

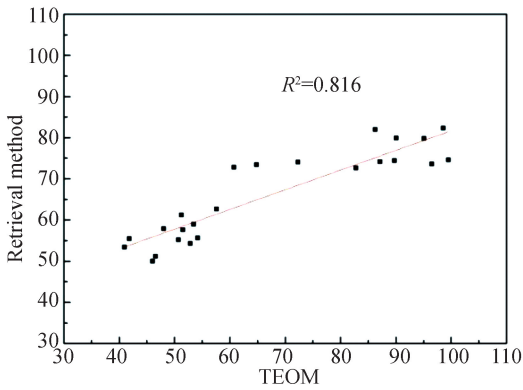
图 3 Fernald 反演值和前向散射能见度仪的测量值比较
Fig. 3 Comparison of extinctions between forward-scattering visibility sensor and Fernald

质量浓度检测仪的测量值比较。图 4 是反演值与颗粒物质量浓度监测仪测量值的对比图和相关性



(a) 小时均值

(a) 1 hour average of mass concentration



(b) 相关性分析

(b) Correlation analysis

图 4 大气气溶胶质量浓度反演值和测量值的比较

Fig. 4 Comparison of atmospheric aerosol mass concentrations between retrieval method and TEOM

分析图。可见反演的大气气溶胶质量浓度和测量值的变化规律相似,相较于颗粒物浓度检测仪的测量值,反演算法得到的数值在 13 点前大于测量值,13 点后小于测量值,但一天时间内的波动相对更小。两者的相关性达到 81.6%,说明反演法获得的结果具有一定的可信度。

图 5 是利用反演的消光系数计算得到的 12 月 11 日至 15 日的大气气溶胶质量浓度在水平路径上的时间演变图。可以看出:(1)质量浓度的水平路径分布在时间上差异较大,12 月 13 日 12 点钟之前气溶胶质量浓度较大,12 月 14 日最小,12 月 15 日又逐渐增大;(2)质量浓度的水平路径分布:在 0~3 km 区间逐渐减小,4~6 km 区间缓慢增加,显示出在此区间污染颗粒物分布不均匀。究其原因主要是测量路径 1~4 km 沿线下

湖面,污染物颗粒物较少,空气较为洁净,而且测量日风速小,气溶胶迁移速度慢,不容易向周边扩散;而在 4 km 后气溶胶质量浓度有上升的趋势,这是由于穿过水面后到达城市郊区,污染物浓度开始增加。

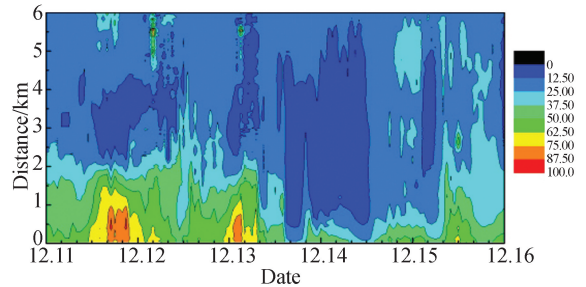


图 5 反演的水平方向大气气溶胶质量浓度廓线

Fig. 5 Retrieval of mass concentration profiles of horizontal atmospheric aerosol

5 结论

本文利用微脉冲激光雷达,结合光学粒子计数器、能见度仪和颗粒物质量浓度监测仪来反演大气气溶胶质量浓度的水平路径分布,得到的反演结果与实际测量值具有很好的一致性。反演法能获得整个路径上的气溶胶分布,相较于传统分点式测量法,更能详细反映出区域内近地面气溶胶颗粒物的浓度变化。该方法可以以测量点为中心进行 0~6 km、360°的水平扫描,从而反映该区域污染颗粒物的面状分布,为城市近地面颗粒物监测提供了很好的测量手段。

参考文献:

- [1] 吴彬,张筱萌,王堰. 气溶胶辐射强迫效率研究[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(4): 253-261.
WU B, ZHANG X M, WANG Y. Research of aerosol radiative forcing efficiency [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(4): 253-261. (in Chinese)
- [2] 任丽新,游荣高,吕位秀,等. 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(1): 67-73.
REN L X, YOU R G, LÜ W X, et al.. The physi-

cal and chemical characteristics of aerosols in the urban region and their influence on human health [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(1): 67-73. (in Chinese)

- [3] 陶燕,刘亚梦,米生权,等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 592-597.
TAO Y, LIU Y M, MI SH Q, et al.. Atmospheric pollution characteristics of fine particles and their effects on human health [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 592-597. (in Chinese)
- [4] 董云升,刘文清,刘建国,等. 激光雷达在城市交

- 通污染中应用研究[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 315-320.
- DONG Y SH, LIU W Q, LIU J G, *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 315-320. (in Chinese)
- [5] 李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1655-1658.
- LI X B, XU Q SH, WEI H L, *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1655-1658. (in Chinese)
- [6] 陶宗明, 麻晓敏, 刘东, 等. 2014年合肥西郊PM_{2.5}质量浓度廓线统计分布[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601001-1.
- TAO Z M, MA X M, LIU D, *et al.*. Statistical distribution of PM_{2.5} mass concentration profiles at west suburb of Hefei City in 2014 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601001-1. (in Chinese)
- [7] 韩道文, 刘文清, 刘建国, 等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. 中国激光, 2006, 33(11): 1567-1572.
- HAN D W, LIU W Q, LIU J G, *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(11): 1567-1572. (in Chinese)
- [8] NOH Y, MÜLLER D, SHINS K, *et al.*. Vertically-resolved profiles of mass concentrations and particle backscatter coefficients of Asian dust plumes derived from lidar observations of silicon dioxide [J]. *Chemosphere*, 2016, 143: 24-31.
- [9] RAUT J C, CHAZETTE P, FORTAIN A. New approach using lidar measurements to characterize spatiotemporal aerosol mass distribution in an underground railway station in Paris [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(3): 575-583.
- [10] 杜其成, 徐赤东, 纪玉峰. 透射式同轴微脉冲激光雷达研制[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(5): 357-360.
- DU Q CH, XU CH D, JI Y F. Development of transmission coaxial micro pulse lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(5): 357-360. (in Chinese)
- [11] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 452.
- SHENG P X, MAO J T, LI J G, *et al.*. *Atmosphere Physics* [M]. Beijing: Beijing University Publishing House, 2003: 452. (in Chinese)
- [12] WMO. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* [M]. 6th ed.. Geneva: WMO, 1996.
- [13] 李学彬, 高亦桥, 魏合理, 等. 双散射角光学粒子计数器的研制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1528-1534.
- LI X B, GAO Y Q, WEI H L, *et al.*. Development of optical particle counter with double scattering angles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1528-1534. (in Chinese)
- [14] 李学彬, 胡顺星, 徐青山, 等. 大气气溶胶消光特性和折射率的测量[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 207-210.
- LI X B, HU SH X, XU Q SH, *et al.*. Characteristics measurement of extinction and refractive index of aerosol particles [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 207-210. (in Chinese)
- [15] 王英俭, 胡顺星, 周军, 等. 激光雷达大气参数测量——中国东部重要大气参数高分辨率垂直分布探查[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 212-214, 299-302.
- WANG Y J, HU SH X, ZHOU J, *et al.*. *Lidar Measurement of Atmospheric Parameters: High Resolution Vertical Distribution of Important Atmospheric Parameters in Eastern China* [M]. Beijing: Science Press, 2015: 212-214, 299-302. (in Chinese)
- [16] KUNZ G J, DE LEEUW G. Inversion of lidar signals with the slope method [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(18): 3249-3256.
- [17] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [18] 杜其成, 纪玉峰, 徐赤东. MPL探测气溶胶水平分布数据处理方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(1): 23-27.
- DU Q CH, JI Y F, XU CH D. Data processing method of aerosol horizontal distribution detected by MPL [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(1): 23-27. (in Chinese)
- [19] 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 微脉冲激光雷达水平探测气溶胶两种反演算法对比与误差分析[J].

光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1774-1778.

LÜ L H, LIU W Q, ZHANG T SH, *et al.*. Two data inversion algorithms of aerosol horizontal dis-

tribution detected by MPL and error analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35 (7): 1774-1778. (in Chinese)

作者简介:



鲁先洋(1979—),男,安徽庐江人,博士研究生,2002年于安徽师范大学获得学士学位,主要从事大气探测研究。E-mail: xianyang@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



徐青山(1965—),男,安徽霍邱人,博士,研究员,1986年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2004年、2007年于安徽光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气订正等方面的研究。E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn

通讯作者:



李学彬(1980—),男,安徽太和人,博士,副研究员,2002年于安徽师范大学获得学士学位,2008年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事大气气溶胶参数光学测量的研究。E-mail: xbli@aiofm.ac.cn