

基于三维大气探测激光雷达的大气颗粒物污染探测

赵文豪^{1,2} 闫利¹ 王成义¹ 马昕³ 李松³ 马跃³

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079
2 国家基础地理信息中心,北京,100830
3 武汉大学电子信息学院,湖北 武汉,430072

摘要:激光雷达是一种监测大气颗粒物分布和传输的有效遥感手段,能够克服常规地面监测站零星分布、无法实现区域覆盖监测的问题。通过布设一台垂直探测激光雷达和一台水平扫描激光雷达,实现大气颗粒物的垂直结构探测以及半径 6 km 内水平分布情况监测,并结合斜率法和 Fernald 算法实现更加精确的水平方向消光系数反演,进而实现以三维数据分析颗粒物的传输、分布和浓度变化情况;并利用地面国控站点数据同水平消光系数进行相关性对比。结果表明,利用三维大气探测激光雷达能够有效地揭示城市地区较大区域内的颗粒物分布和传输情况,具有覆盖范围大、探测效率高的优点。

关键词:颗粒物污染;激光雷达;三维数据;水平扫描
中图分类号:P208 **文献标志码:**A

随着中国经济的飞速发展,工业、交通也迅猛发展,城市扩张,人口集中,各种环境问题也层出不穷,其中大气污染,尤其是颗粒物(气溶胶)污染具有广泛的空间分布,对人体健康产生较大危害^[1]。空气动力学当量直径小于 10 μm 的颗粒物被称为 PM₁₀,直径小于 2.5 μm 的颗粒物被称为 PM_{2.5},二者均具有可吸入性,前者通常可以沉积到上呼吸道,而后者可以进入肺泡,对身体危害极大;同时细颗粒物在大气中停留时间长,也影响了大气能见度和大气环境质量^[1-3]。

在颗粒物污染监测中,近地表的监测备受人们关注,各个城市中普遍设立了空气质量监测站,同时监测颗粒物浓度(PM₁₀、PM_{2.5})、硫氧化物、氮氧化物等参数,能够测量站点附近大气污染的详细参数,测量精度高,但受制于成本,不能广泛布站,覆盖区域的测量很难实现,无法全面反映气溶胶的分布。激光雷达作为一种遥感手段,能够进行长距离、高频次的探测,探测结果可以有效反映激光传输路径内的气溶胶分布情况,是当前遥感探测颗粒物污染的有效手段,被广泛应用于城市大气污染探测中^[4-11]。国内外多家单位开展

了激光雷达用于大气探测的研究,其中中科院安光所^[4-7]、武汉大学^[8]、西安理工大学^[9]等多家国内单位,以及法国索邦大学^[10]、日本国立环境研究所^[11-12]、意大利^[13]、美国 NOAA^[14]等国外研究机构均利用激光雷达进行了颗粒物探测。

当前国内外的研究中,都是单独进行垂直探测^[1, 5, 8-10, 12-17]或者水平探测^[4, 6-7],鲜有结合三维探测的激光雷达数据进行相关研究。垂直探测可以确定探测地点上空的气团垂直分布和运动,但是不能获得区域性的颗粒物分布;水平探测可用于识别该区域的颗粒物水平分布,但牺牲了时间分辨率,无法获得颗粒物的传输规律;而同时结合垂直和水平探测组成的三维数据,即可实现两种探测方式的优势互补,从而实现对颗粒物更全面的监测和研究。本文即利用两台微脉冲激光雷达对天津市武清区中心城区进行了全天时的遥感探测,其中一台激光雷达进行垂直测量,探测颗粒物的传输、沉降;另外一台激光雷达架设于高楼顶,进行水平扫描,探测颗粒物的水平分布。通过对两台激光雷达的三维数据的分析,揭示区域性的颗粒物污染分布和传输情况。

1 三维大气污染探测原理与方法

1.1 大气探测激光雷达原理

激光雷达是一种主动探测设备,它向大气中发射激光脉冲,激光束与大气气溶胶粒子和大气分子等发生相互作用,产生回波信号被接收望远镜接收,然后对回波信号进行采集、反演就可以得到大气气溶胶的光学特征信息。激光雷达探测大气颗粒物具有很高的空间和时间分辨率,是目前有效获得大气颗粒物垂直分布廓线的重要手段。

1.2 实验方法和研究区域介绍

本文中为了获取大气颗粒物的三维数据,同时采用了两台激光雷达分别进行大气垂直和水平扫描探测。垂直探测和水平扫描激光雷达的技术指标如表 1 所示。在大气激光雷达探测中一般采用的是 Nd:YAG 激光器的基频光,即 1 064 nm,因此本文采用的激光雷达的激光波长均为 1 064 nm。同时对激光雷达进行了一体化设计,并加入窄带滤光片,使得其具有全天时、全天候工作能力,从而实现 24 h 连续监测。

表 1 激光雷达技术参数

Tab. 1 Parameters of the Two LiDARs		
参数	垂直 LiDAR	水平 LiDAR
波长/nm	1 064	1 064
能量/ μ J	>100	>20
脉冲频率/kHz	1	1
望远镜口径/mm	100	100
距离分辨率/m	30	15
滤光片带宽/nm	0.5	0.5

激光雷达的布设区域选择在天津市武清区城区。武清城区处于京津冀的中心地带,其大气颗粒物污染受外地源影响较为明显,希望通过激光雷达遥感探测的手段找出污染的传输方向,并初步判定污染源。垂直探测激光雷达和水平探测激光雷达分别部署于同一小区内不同建筑楼顶,为保证水平探测路径内无遮挡,将水平探测激光雷达部署于城区内的一栋 33 层居民楼楼顶,具体地理位置在水平扫描结果中可见。

1.3 垂直探测激光雷达反演算法

大气探测激光雷达信号反演中一般采用 Fernald 算法^[18],该算法主要是区分了大气气溶胶和大气分子,并引入激光雷达比的概念,进行大气气溶胶消光系数和后向散射系数的计算。具体如下:

$$P(r) = ECr^{-2}\beta(r)\exp[-2\int_0^r\sigma(r)dr]$$

(1)

$$S_1 = \sigma_1(r)/\beta_1(r)$$

(2)

$$S_2 = \sigma_2(r)/\beta_2(r)$$

(3)

$$\sigma_1(I-1) + \frac{S_1}{S_2}\sigma_2(I-1) = X(I-1) \times \exp[+A(I-1,I)] / \left\{ \frac{X(I)}{\sigma_1(I) + (S_1/S_2)\sigma_2(I)} + X(I)\Delta r + X(I-1)\exp[+A(I-1,I)]\Delta r \right\}$$

(4)

式(1)为典型的大气激光雷达方程,是大气颗粒物探测的基本方程,所有利用激光雷达进行大气探测均是基于该方程进行的,其中, P 为激光雷达回波信号强度功率; r 代表探测距离; E 为激光雷达固定参数,包括发射激光功率等; C 为矫正常数; β 为大气后向散射系数; σ 为大气消光系数。式(2)和式(3)分别是大气气溶胶和大气分子的激光雷达比计算方程,是 Fernald 算法的核心,其中 S_1 和 S_2 分别是大气气溶胶和大气分子的激光雷达比;大气分子的激光雷达比为固定值 $8\pi/3$,下标 1 表示大气颗粒物/气溶胶,下标 2 表示大气分子。式(4)为利用 Fernald 算法进行消光系数的后向积分方程,其中 I 代表高度相关的计数值。

通过确定激光雷达比、标定高度和标定高度处的大气气溶胶消光系数 3 个参数后,即可以利用 Fernald 算法进行气溶胶消光系数的计算。其中激光雷达比一般采用定值简化计算,本文设定为 50;标定高度选择在相对洁净、大气气溶胶少的区域,本文选择高度 10 km 为标定高度 r_c ,该处的气溶胶消光系数计算采用经验公式 $a_1(r_c) = (1.01 - 1)a_2(r_c)$ 计算^[18],其中分子的消光系数由大气模式给出。

1.4 水平扫描激光雷达反演算法

水平扫描激光雷达信号处理算法是在垂直探测算法的基础上完成的。目前一般采用的是斜率法或者 Fernald 法,但前者的问题在于其假定的大气分布均匀状态在实际情况下不成立,而后的弊端在于无法获得标定高度(距离)及在此处的气溶胶消光系数^[18-21]。

为减小反演误差,本文结合斜率法和 Fernald 算法,提出了一种新的水平扫描反演算法。斜率法不存在激光雷达比的问题,但水平方向上某小段距离内可以认为大气状态均匀,在本次实验中,先根据原始激光雷达信号确定大气分布均匀的一段距离,并以斜率法获取该处的气溶胶平均消光系数,将结果作为 Fernald 算法的标定高度(距离)和此处的消光系数标定值。

由于获取的是中间距离的消光系数,因此利用 Fernald 算法时,分别进行前向和后向积分,从而得

到较为准确的大气气溶胶消光系数反演结果。

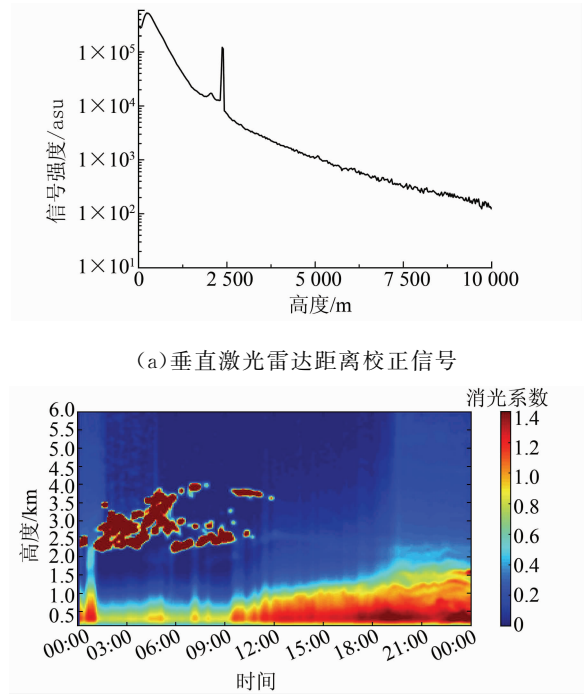
2 三维大气污染探测实验与结果分析

本文选取 2018 年 7 月 16 日水平和垂直激光雷达数据进行反演,揭示该地区的颗粒物三维分布特征,并同地面空气质量国控站点的 PM 数据进行校正和对比分析。

2.1 垂直探测结果分析

对 7 月 16 日连续 24 h 的垂直探测结果,利用 Fernald 算法进行反演,标定高度选为 10 km,图 1(a)为 2018 年 7 月 16 日凌晨 00:30 时刻的单条垂直激光雷达距离校正信号,可以看出激光传输距离较远,表明高层大气较为洁净,在高度 0.5 km 附近,信号强度先增加后减小是由于 overlap 效应造成的,即激光没有完全进入望远镜视场;在高度 2.5 km 处,激光雷达回波信号出现突增现象,表明此处有明显的云层,但厚度较薄,穿过云层后激光的衰减较小,继续传输至高空。

图 1(b)是 7 月 16 日连续 24 h 垂直探测得到的大气气溶胶消光系数,通过消光系数可以直接反映出大气气溶胶的浓度情况,其中高度 2.5 km 处的消光系数出现极大值,是由于云层造成的,不在本文的研究范围内。



(a)垂直激光雷达距离校正信号

(b)垂直激光雷达连续探测的气溶胶消光系数

图 1 垂直激光雷达探测结果

Fig. 1 Observation Results of Vertical LiDAR

一般情况下,气溶胶主要集中在边界层内,由于探测时间为夏天,边界层高度较高,利于污染物

扩散。根据查询到的气象数据,激光雷达探测从 0 时至早上 8 时左右,边界层以下的颗粒物浓度较低,且呈逐渐消散(扩散)的趋势;但从早上 8 时左右开始,上午低空的气溶胶消光系数持续增加,可以看出,颗粒物污染也持续增加,表明当地的人为颗粒物排放较为严重,同时颗粒物由低空向高空传输的特征明显,因此可以判定当天的大气气溶胶污染主要是本地源,即从地面向高空扩散;白天污染持续增加,到夜晚 24 时达到顶峰,这一现象主要是人为活动造成的。武清区是天津和北京的交界处,该处白天和夜晚的交通活动较强,同时夜晚气溶胶浓度持续增加的主要原因不排除当地企业夜间生产偷排的情况。

2.2 水平扫描结果分析

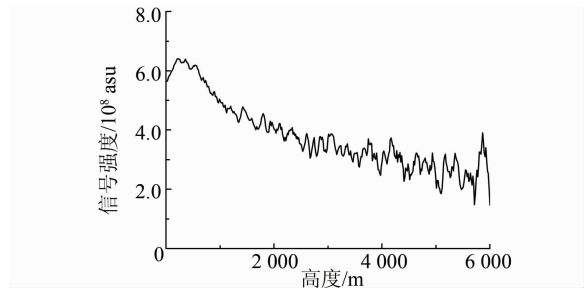
通过布设在居民楼顶的水平扫描激光雷达(117.04°E, 39.39°N)探测气溶胶在水平方向上的分布。为了保证信噪比,将单次扫描角度时间设置为 20 s,扫描步进角度为 2°,水平方向顺时针扫描一圈时间为 1 h。利用本文提出的水平反演算法进行了消光系数反演,图 2(a)为 7 月 16 日凌晨 00:30 激光雷达单次扫描得到的距离校正信号,同图 1(a)相比,水平探测中,由于地表附近较高空气溶胶浓度高,因此回波信号随距离增加而衰减的程度较大;同时由于水平气溶胶分布的不均匀性,水平探测的回波信号波动也较大,采用斜率法进行反演会造成一定的反演误差。

图 2(b)为水平方向上 1 h(16 日凌晨 00:25—01:25)探测得到的大气气溶胶消光系数分布图,其中 A 为激光雷达站点位置,图中消光系数较大的区域气溶胶浓度较高,此段时间内污染集中在以探测点为中心的主城区内,以及南部高铁站附近。由于是凌晨,气溶胶污染主要集中在城区附近,人口密度高,与生产、生活、交通的污染排放有关,而郊区的人类活动和生产较少,污染较低。

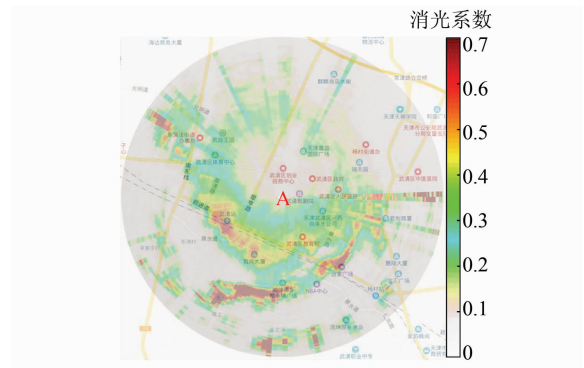
图 2(c)为一天 24 h 连续探测后的数据融合结果,反映 24 h 内区域中的污染较大区域分布。采取的方法是提取高污染区域的颗粒物数据,剔除低污染部分,并融合到一张图中。可以看出,当天 24 h 内共有 8 个污染较重的区域,标号 3~8 的污染区域主要集中在城区中,表明城区人为活动是造成颗粒物污染的主要原因;1 号、2 号区域位于远城区,人类活动较少,但实际污染程度也较大,根据实地调查,两处地区有本地工厂,工业活动是造成该区域气溶胶浓度上升的主要原因。

根据垂直激光雷达探测的结果,如图 1(a)所

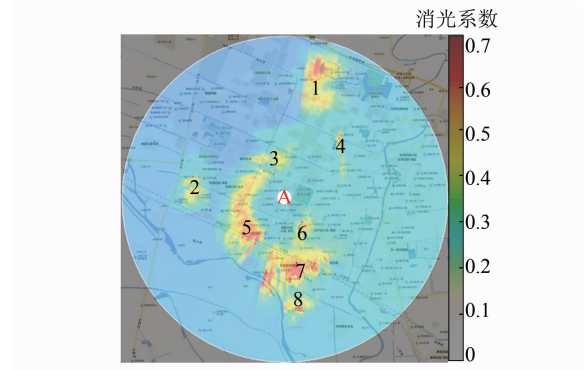
示,可知当天气溶胶污染源主要是本地源,结合图 2(c),充分表明在本地污染源起主导作用的情况下,大气气溶胶污染主要集中在城区部分;同时结合图 2(b)可知,城区地区发达的交通和密集的人口加重了武清区的夜间污染,且密集建筑物使得气溶胶扩散不易。



(a) 水平扫描激光雷达距离校正信号



(b) 水平扫描激光雷达 1 h 消光系数



(c) 水平扫描激光雷达数据 24 h 融合结果

图 2 水平扫描激光雷达探测结果

Fig. 2 Observation Results of Horizontal Scanning LiDAR

3 讨论

需要说明的是,激光雷达探测反演得到的颗粒物消光系数是相对值,可以在一定程度上反映出观测区域中的颗粒物浓度情况,一般情况下,这种探测结果结合地面国控站数据即可实现区域内

的颗粒物密集监测,但无法直接将颗粒物的消光系数转换到绝对的颗粒物浓度值。研究表明,颗粒物浓度同激光雷达探测得到的消光系数间存在一定的线性关系,尤其是颗粒物消光系数和 PM10 之间的线性关系更为明显。因此在完成垂直和水平激光雷达探测实验后,为初步验证激光雷达探测结果的准确性,将激光雷达水平扫描结果同地面站点数据进行对比,地面站点数据采用的是扫描区域内的国控站点 PM10 数据。

需要指出的是,由于激光雷达是位于高点处进行扫描的,其探测结果同地面国控站点间必定存在一定的偏差,因此在进行相关性计算时,需要考虑到当天的风速和风向,若风速较大,需要以下风处的气溶胶消光系数平均值作为对比值,为了降低对比误差,本文此次选取了风速较低的情况下的数据。

图 3 是激光雷达探测到的气溶胶消光系数同 PM10 间的相关性对比,由于水平激光雷达数据获取周期为 1 h,因此对国控站的 PM10 数据进行小时平均,采用 223 组对比数据,即近 10 d 的数据,拟合得到的颗粒物消光系数反演 PM10 浓度的经验公式为: $y = 767.82x + 10.08$, R^2 为 0.85,表明二者间的线性关系较为明显,即颗粒物的消光系数可以转换为精度较高的颗粒物浓度数据。若通过长期数据积累,可以得到更为准确的经验公式。

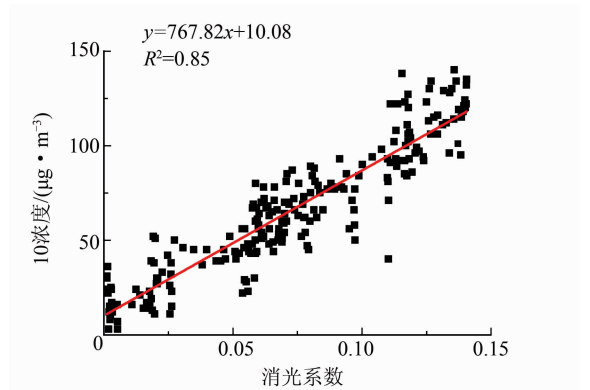


图 3 气溶胶消光系数和 PM10 的相关性对比分析图

Fig. 3 Comparison and Analysis of Correlation Between Aerosol Extinction Coefficient and PM10

通过上述实际数据对比分析,可以认为气溶胶消光系数和颗粒物浓度(尤其是 PM10)间的线性程度较高,因此,在获取一定时间内的经验公式后,可以利用激光雷达探测到的气溶胶消光系数的水平分布图,直接反映扫描区域内颗粒物浓度的分布情况。

4 结 语

本文利用两台激光雷达分别进行垂直方向和水平扫描探测,获得了区域性的气溶胶三维分布结果。其中利用垂直探测得到气溶胶的垂直分布,并说明一天24 h内边界层高度变化下低层大气气溶胶的扩散情况,初步揭示当天的气溶胶污染源是本地或是外地;同时利用布设在高楼顶的水平扫描激光雷达获取气溶胶的水平分布结果,探明扫描区域内的气溶胶污染分布情况。三维数据的激光雷达相比于传统的被动站点布设,能以更少的成本反映区域的气溶胶分布情况以及变化趋势,为城市颗粒物监测和治理提供了有效的测量手段。

需要指出的是,单独的激光雷达只能对区域气溶胶进行实时监测,若加上偏振通道,则可以区分本地和外源沙尘性气溶胶,但仍然无法实现对污染物的溯源、预测。而卫星遥感手段能够对大尺度的PM_{2.5}、PM₁₀进行监测,结合气象数据,构建后向轨迹模型,追溯气团运动轨迹,可以实现对颗粒物污染的追踪和预测,这也是下一步需要完善的工作。

参 考 文 献

- [1] Tian Xiaomin, Liu Dong, Xu Jiwei, et al. Review of LiDAR Technology for Atmosphere Monitoring [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(5):321-341(田晓敏,刘东,徐继伟,等. 大气探测激光雷达技术综述[J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(5):321-341)
- [2] Fan W Z, Qin K, Xu J, et al. Aerosol Vertical Distribution and Sources Estimation at a Site of the Yangtze River Delta Region of China[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 217:128-136
- [3] Tao Yan, Liu Yameng, Mi Shengquan, et al. Atmospheric Pollution Characteristics of Fine Particles and Their Effects on Human Health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3):592-597(陶燕,刘雅梦,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)
- [4] Du Qicheng, Ji Yufeng, Xu Chidong. Data Processing Method of Aerosol Horizontal Distribution Detected by MPL[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(1):23-27(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)
- [5] Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo, et al. Application Study of LiDAR in Urban Traffic Pollution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2):315-320(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)
- [6] Lu Xianyang, Li Xuebin, Qin Wubin, et al. Retrieval of Horizontal Distribution of Aerosol Mass Concentration by Micro Pulse LiDAR[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7):1 697-1 704(鲁先洋,李学彬,秦武斌,等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7):1 697-1 704)
- [7] Bo Guangyu, Xu Chidong, Li Aiyue, et al. Optical and Hygroscopic Properties of Asian Dust Particles Based on a Horizontal Mie LiDAR: Case Study at Hefei, China[J]. *Chinese Optics Letter*, 2017, 15: 020102
- [8] Tian Liqiao, Chen Xiaoling, Qiu Feng, et al. Atmospheric Correction over Coastal Turbid Waters Based on Space-borne LiDAR Aerosol Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 960-963(田礼乔,陈晓玲,邱凤,等. 星载激光雷达气溶胶数据辅助的近岸浑浊水体大气校正研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8): 960-963)
- [9] Liu Jun, Hua Dengxin, Li Yan, et al. Design of a Compact Mie LiDAR System[J]. *Journal of Xian University of Technology*, 2007, 23(1):1-5(刘君,华灯鑫,李言,等. 小型米散射激光雷达系统设计[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(1):1-5)
- [10] Ancellet, Penner E, Pelon J, et al. Aerosol Monitoring in Siberia Using an 808 nm Automatic Compact LiDAR[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12: 147-168
- [11] Sugimoto N, Uno I, Nishikawa M, et al. Record Heavy Asian Dust in Beijing in 2002: Observations and Model Analysis of Recent Events[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12):1 640
- [12] Yumimoto K, Uno I, Sugimoto N, et al. Numerical Modeling of Asian Dust Emission and Transport with Adjoint Inversion Using LiDAR Network Observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7:15 955-15 987
- [13] Pappalardo G, Amodeo A, Pandolfi M, et al. Aerosol LiDAR Intercomparison in the Framework of the EARLINET Project. 3. Raman LiDAR Algorithm for Aerosol Extinction, Backscatter and LiDAR Ratio[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(28): 5 370-5 385
- [14] John B, Parikh S, Trevor K. Atmospheric Aerosol

Profiling with a Bistatic Imaging LiDAR System [J]. *Applied Optics*, 2007, 46: 2 922-2 929

[15] Zhao G Y, Malmqvist E, Török S, et al. Particle Profiling and Classification by a Dual-band Continuous-Wave LiDAR System [J]. *Applied Optics*, 2018, 57: 10 164-10 171

[16] Fang Xin, Wang Min, Hu Shunxing. Distribution Characteristics of Atmospheric Pollutions in Meiyu Season Observed by LiDAR over Hefei[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 302-309(方欣,王敏,胡顺星. 合肥梅雨季节大气污染物分布特征的激光雷达探测[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 302-309)

[17] Di Huige, Hou Xiaolong, Zhao Hu, et al. Detections and Analyses of Aerosol Optical Properties Under Different Weather Conditions Using Multi-Wavelength Mie LiDAR[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 248-255(狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 248-255)

[18] Fernald F G. Analysis of Atmospheric LiDAR Observation—Some Comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653

[19] Gerard J K, Gerritde L. Inversion of LiDAR Signals with the Slope Method[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(18): 3 249-3 251

[20] Zeng X J, Guo W P, Yang K C. Noise Reduction and Retrieval by Modified LiDAR Inversion Method Combines Joint Retrieval Method and Machine Learning[J]. *Applied Physics B: Laser and Optics*, 2018, 124(12): 238

[21] Lü Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, et al. Two Data Inversion Algorithms of Aerosol Horizontal Distribution Detected by MPL and Error Analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015 (7): 1 774-1 778(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(7): 1 774-1 778)

Detection of Atmospheric Particulate Matter Pollution Based on Three-Dimensional Atmospheric Detection LiDAR

ZHAO Wenhao^{1,2} YAN Li¹ WANG Chengyi¹ MA Xin³ LI Song³ MA Yue³

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 National Basic Geographic Information Center, Beijing 100830, China
3 Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: LiDAR is an effective remote sensing method for monitoring the distribution of atmospheric particulate matter (PM), which can overcome the shortcoming of scattered distribution and failure to achieve regional monitor of the conventional ground monitoring stations. In order to determine the horizontal distribution and transportation of PMs in urban areas, a vertical observation LiDAR and a horizontal scanning LiDAR are applied to achieve the goal. A more accurate retrieval method is developed by combining the slope algorithm and Fernald algorithm. The transport, distribution and concentration are analyzed using three-dimensional LiDAR data. The results of the horizontal aerosol extinction coefficient of the LiDAR are compared with the PM concentration from the ground state-controlled station to analyze their correlation. The results show that the three-dimensional atmospheric LiDAR can effectively reveal the distribution of PMs in large urban areas, and has the advantages of wide coverage and high detection efficiency.

Key words: particulate pollution; LiDAR; three-dimensional data; horizontal scanning

First author: ZHAO Wenhao, PhD, specializes in remote sensing information extraction and analysis. E-mail: zhaowh@ngcc.cn
Corresponding author: MA Xin, PhD, lecturer. E-mail: maxinwhu@gmail.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41801261, 41827801, 41601351; Postdoctoral Science Foundation of China, Nos. 2016M600612, 2016M602362.