

文章编号:1004-4213(2010)01-0279-5

北京奥运前期典型天气喇曼激光雷达观测研究*

佟彦超, 刘文清[†], 赵南京, 刘建国, 伍德侠, 董云升, 陆亦怀

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

摘要:以自行研制的双波长三通道拉曼激光雷达、振荡天平(PM10、PM2.5)、碳黑(BC)气溶胶分析仪及能见度仪相结合对“好运北京”2008年奥运会前期典型天气状况进行了测量与分析,给出了北京奥运主场馆上空气溶胶消光系数的垂直分布及其时空变化关系,计算了气溶胶的消光散射比,并分析了灰霾天气条件下大气能见度、气溶胶颗粒物PM10、PM2.5、BC及气溶胶消光系数垂直分布之间的相互关系. 研究表明,灰霾天气条件下,大气能见度、颗粒物质量浓度与气溶胶颗粒物消光系数之间具有直接的相关性.

关键词:拉曼激光雷达;气溶胶;消光系数;颗粒物质量浓度;能见度

中图分类号:P407.5

文献标识码:A

doi:103788/gzxb.20103901.0279

0 引言

随着我国经济的快速发展,城市群区域大气复合污染状况愈加严峻,光化学烟雾污染和高浓度的臭氧污染频繁出现在北京地区和珠江三角洲及长江三角洲,尤为突出的是颗粒污染物正成为我国大气复合污染中的首要污染物.

激光雷达是以激光为光源,通过探测激光与大气相互作用的光波信号来遥感大气.光波与大气中介质相互作用,产生包含气体分子和气溶胶粒子有关信息的辐射信号,利用适当的反演方法就可以从中得到关于气体分子和气溶胶粒子的相关信息^[1-2].利用弹性散射(包括Mie散射)信号确定颗粒物消光系数的方法无法改变这样的事实:根据雷达信号来同时确定气溶胶消光系数和后向散射系数这两个未知的物理量.因此必须假设两者之间的关系,并且还需要估计一个气溶胶消光系数的边界值或者说参考值^[3-4].通常来说,这些值是很难估计的,因此在确定气溶胶消光系数时将导致一定的不确定性.而采用拉曼激光探测技术则可以完全独立地反演气溶胶后向散射和消光系数^[5-6],与常规的Mie散射雷达相比,在获得气溶胶空间分布的同时,能够获得气体分子的廓线分布信息.

本文是在中国科学院2007年“北京地区大气环境监测行动计划”成功实施的基础上,利用2008年

奥运会的难得机遇,立足具有自主知识产权的创新成果,通过各技术间的对比、补充、结合,进一步完善区域大气复合污染高技术综合监测系统.为奥运会的空气质量保障提供及时准确的预测和风险评估数据,不仅对保证奥运期间的空气质量有重要意义,而且为认识和改善北京环境问题,并为其今后的空气质量改善提供治理的依据与参考.

1 喇曼雷达系统

系统主要分为三个部分:光学发射与接收光学系统、光电探测组件中的电子学系统(包括激光器电源、信号放大、采集和控制单元)以及信号存储与数据处理系统.为了方便仪器运输及外场实验使用,系统整体封装于一机箱内,系统各部件最大化的实现了小型化、紧凑化和轻量化.其中激光器与发射光学单元和接收光学单元以及光电倍增管探测器全部一体化地固定在一起,避免了外部振动引发各部件之间相对位移的影响;激光器电源所需的强电与信号探测采集单元所需的弱电相互隔离,并且各弱电器件集中在仪器柜中,缩短了弱电信号在线路传输中的损失.系统原理如图1.

光学发射部件包括脉冲激光器、光束准直器和光束发射器.采用Nd:YAG二倍频与三倍频532 nm和355 nm输出波长作为光源,其单脉冲能量分别约为55 mJ和65 mJ,重复频率20 Hz;激光经光束准直与发射器发射到大气中与大气气溶胶及大气中的氮气分子相互作用.光学接收部件包括一反射式卡塞格林望远镜、窄带滤光片和光电探测器;由望远镜接收来自大气气溶胶和氮气分子喇曼散射回波信号,经窄带滤光片和准直透镜后由光电倍增

*中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-119)和国家高技术研究发展计划(863计划)(2006AA06A302)资助

[†]Tel:0551-5591040

Email:wqliu@aiofm.ac.cn

收稿日期:2009-01-07

修回日期:2009-02-20

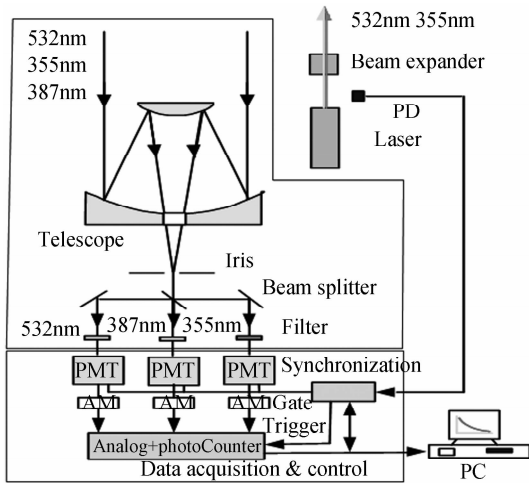


图1 喇曼激光雷达系统原理框图

Fig.1 Schematic of raman lidar system

管进行信号探测. 信号检测部件包括前置放大器、采样平均器及计算机, 光电倍增管记录的信号经放大与滤波后由计算机进行处理并实时显示数据结果.

对于喇曼激光雷达, 非弹性后向散射信号仅受气溶胶消光而不受后向散射的影响. 因此根据大气中氮气分子的拉曼散射回波信号可以直接进行气溶胶消光系数的反演, 可表示为^[4]

$$\alpha_{\text{aer}}(\lambda_L, z) = \left\{ \frac{d}{dz} \left[\ln \left(\frac{N(z)}{P(z)z^2} \right) \right] - \alpha_{\text{mol}}(\lambda_L, z) - \alpha_{\text{mol}}(\lambda_R, z) \right\} / \left[1 + \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k \right] \quad (1)$$

式中: λ_L 和 λ_R 分别为入射激光和喇曼散射光波长, k 为气溶胶消光波长指数, $P(z)$ 为距离 z 处拉曼波长下的回波信号强度, α_{mol} 和 α_{aer} 分别是由于大气气体吸收和瑞利散射及气溶胶散射和吸收的消光系数; $N(z)$ 为大气中氮气分子的数浓度, α_{mol} 与 $N(z)$ 可由探空或模式数据给出. 结合弹性散射信号便可以计算出气溶胶散射系数及消光散射比等信息.

2 结果与分析

2.1 气溶胶参量分析

利用所研制的双波长三通道拉曼激光雷达, 对2008年“好运北京”奥运会主场馆前期典型天气状况进行了实时、在线测量, 结合地面颗粒物及能见度测量信息, 分析了灰霾天气条件下各参量之间的相关性. 拉曼雷达系统、颗粒物质量浓度监测仪及能见度仪放置于北京奥运村中国科学院遥感应应用研究所院内, 距离奥运会主场馆“鸟巢”直线距离约500 m. 图2给出了2008年7月19日至28日中午12时的气溶胶消光系数的垂直分布, 通过12:01~12:59分之间测量的4组数据平均进行消光系数的计算. 由于2008年7月19~23日天气较为清洁, 由图可见, 19~23日气溶胶的消光系数较低, 最大消光系

数值出现在约0.8~1.2 km范围内, 最大消光系数仅为0.0013 km⁻¹. 而23~28日随着灰霾天的形成, 气溶胶消光系数出现了较大幅度的增高, 最大值约为23日的1000倍, 灰霾天气条件下低空污染层具有较大的消光系数且出现了复杂的多层结构, 主要是由于大量的人类活动所产生的污染物悬浮于大气中所造成.

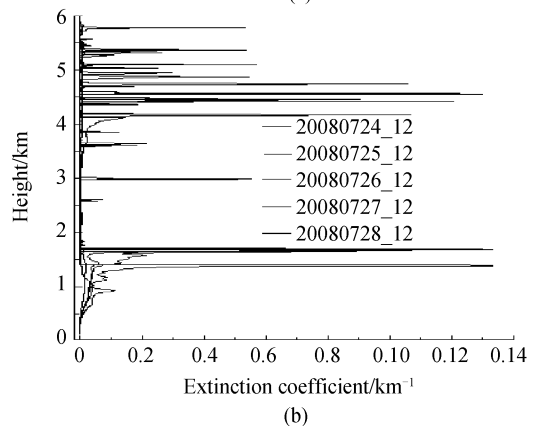
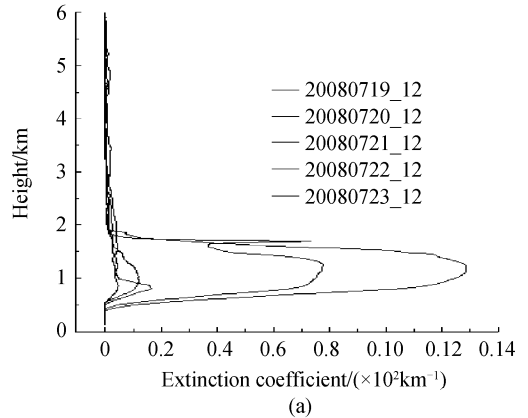


图2 2008年7月19日至28日中午12时的气溶胶消光系数的垂直分布

Fig.2 The aerosol extinction coefficient vertical distribution at July 2008

图3给出了2008年7月19~28日532 nm激光的后向散射回波信号及气溶胶消光系数的时空分布. 回波信号显示污染层高度减小趋势, 其中7月19~22日天气较为晴朗, 能见度相对较高, 由此测量的回波信号也相对较远. 自23号开始, 天气成雾状——灰霾天气开始. 因此从图中可以看出, 灰霾天气所得到的回波信号在近距离产生较强的回波, 能见度较差, 在2 km范围以下, 从532 nm回波信号可以清晰地看出低空污染层时空分布状况. 从19~28日消光系数的时空分布可以看出, 消光系数较强的天气为灰霾天气, 19~21日虽然具有较强的回波信号, 但是其消光系数远低于灰霾天气状况下的强度分布. 从回波信号及消光系数的变化分析, 天气状况对测量结果的决定性较大. 灰霾天气条件下, 低空污染层消光系数的明显增大说明了污染物的增

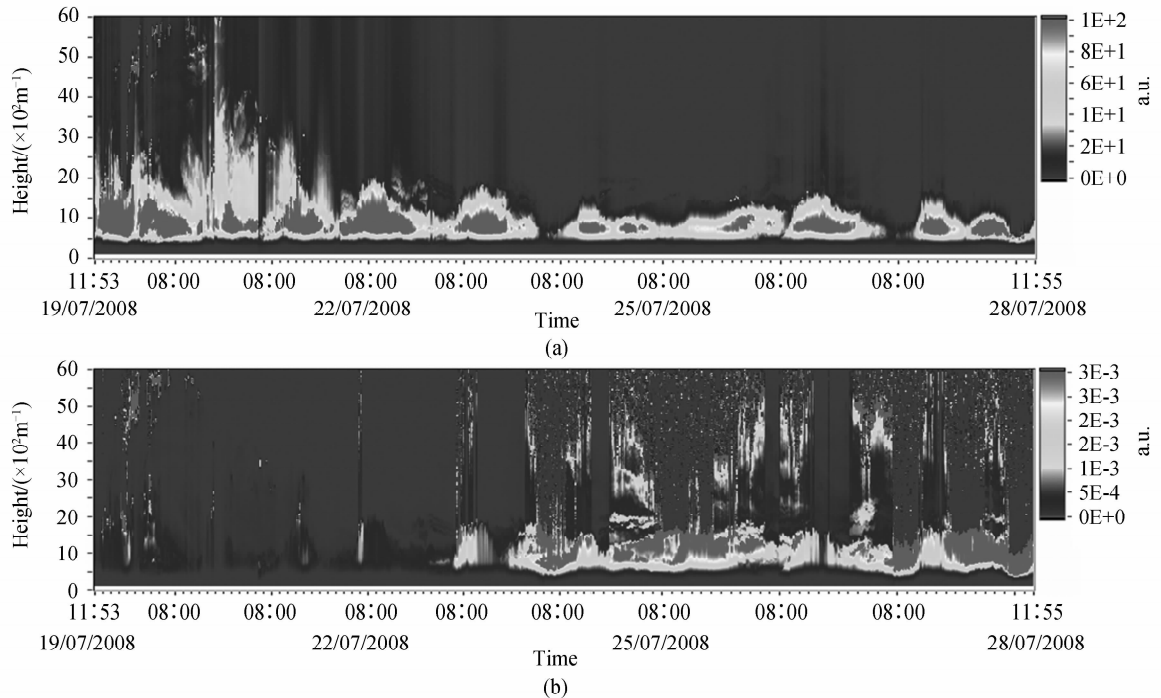


图3 2008年7月19日至28日532 nm回波信号(上)及消光系数(下)时空分布

Fig. 3 The backscatter signal of lidar (top) and aerosol extinction coefficient vertical distribution (bottom) at July 2008

加,污染层集中分布在0.5~1.8 km范围之内.分析其原因,主要是灰霾天条件下低空污染物随着人们的活动大量增加无法快速释放,导致了在低空的堆积.在回波信号图中,低空污染物具有较强的回波信号强度,因此看不出明显的云和分层现象.

图4给出了2008年7月22日21:00~23:59时利用氮气分子拉曼散射回波信号387 nm和355 nm计算得到的气溶胶消光系数、后向散射系数及气溶胶消光散射比(简称雷达比).通过计算,雷达比平均值约为30.

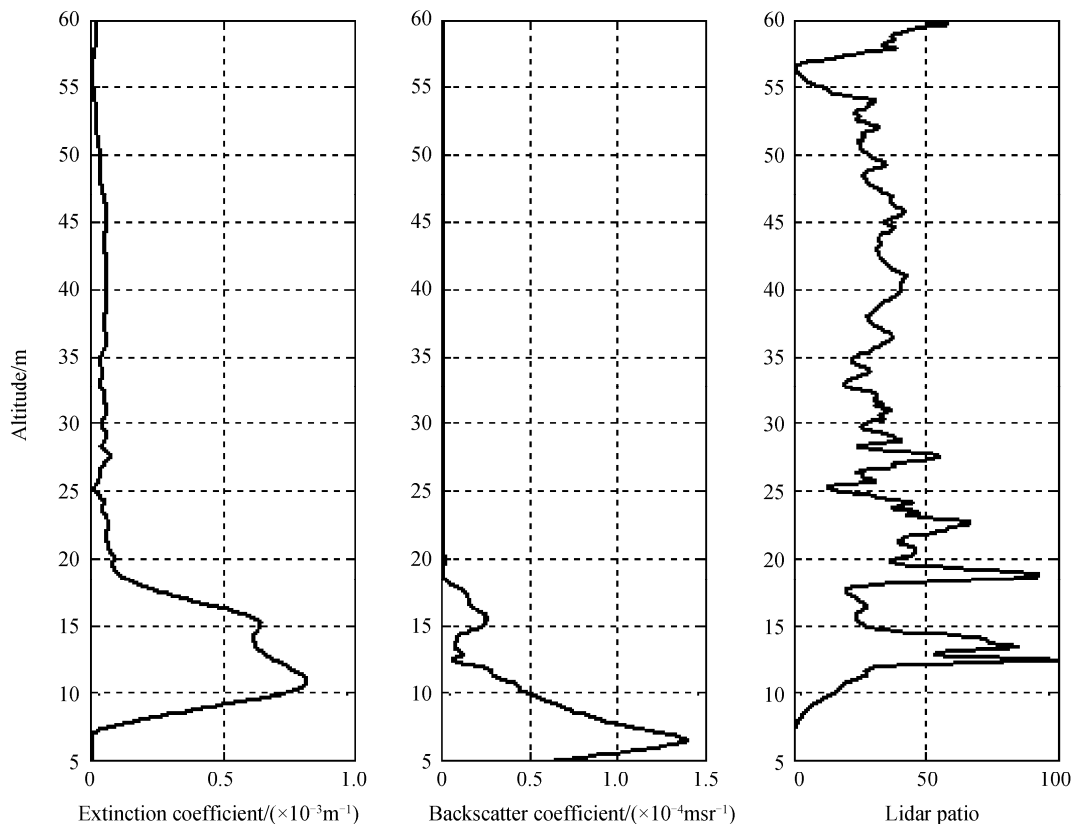


图4 2008年7月22日21:00~23:59时气溶胶消光系数、后向散射系数及消光散射比

Fig. 4 The aerosol extinction coefficient, backscatter coefficient and lidar ratio at July 22, 2008

2.2 颗粒物质量浓度与能见度

观测实验中利用中国科学院安徽光机所自行研制的颗粒物质量浓度(PM₁₀、PM_{2.5}及BC)与能见度监测仪进行了近地面颗粒物浓度与大气能见度的测量,仪器型号及测量指标见表1.

表1 颗粒物质量浓度与能见度测量仪器

Type	Instrument	LD
PM ₁₀	TEOM+PM ₁₀ cutter	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM _{2.5}	TEOM+PM _{2.5} cutter	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
BC	Black Carbon analyzer(BCA7)	0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Visibility	Visibility meter(AG-I)	20 km

图5给出了2008年7月19日至28日颗粒物质量浓度的日均分布.从图中可以看出,灰霾天气条件下,PM₁₀/PM_{2.5}质量浓度随之增加,7月23日至28日的PM₁₀日均浓度超过了国家二级标准(150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).2008年7月18日至20日间,由于北京地区经历了一次强对流天气,大范围的降雨导致了悬浮颗粒物的湿沉降,且在较强风力的影响下,颗粒物气溶胶也存在着较快水平扩散现象,使该段时期及其后两天,悬浮颗粒物浓度水平较低.由图6可见,7月18日至23日,可吸入颗粒物PM₁₀、PM_{2.5}和BC(碳黑颗粒)的质量浓度变化趋势相近,且数值较低.7月20日后,北京地区无降雨过程,且风力较弱,加上灰霾天的产生,导致悬浮颗粒物积聚,浓度上升.尤其在23日至28日期间以东南风向为主,也致使河北、天津一带污染排放输送至北京地区.对图6中碳黑(BC)颗粒浓度与PM₁₀、PM_{2.5}进行比较,碳黑颗粒浓度趋势与PM_{2.5}吻合较好,原因为BC颗粒的粒径一般小于2.5 μm ,且主要来源于

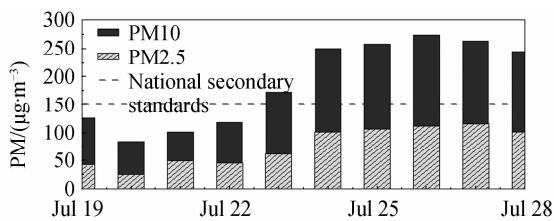


图5 PM₁₀/PM_{2.5}日均浓度趋势图

Fig. 5 The daily mean variation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration at July 2008

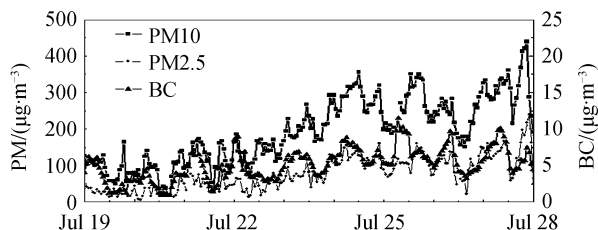


图6 PM和BC时均浓度趋势图

Fig. 6 The hourly mean variation of PM₁₀, PM_{2.5} and BC concentration at July 2008

人类活动中未充分燃烧过程,如工厂排放、交通排放等.而测量站点位于奥体中心附近,交通繁忙,车流量、人流量的增大导致了扬尘的可能性增加,造成了PM₁₀的浓度变化幅度远远大于PM_{2.5}和BC.

颗粒物对光的散射和吸收是影响能见度的重要因素之一,其变化趋势如图7.7月18日、19日由于多雨,尽管颗粒物浓度较低,湿度较大也造成了能见度较低;19日至23日期间,颗粒物由于湿沉降和水平扩散,浓度较低,且降雨过程的结束使得湿度恢复正常水平,能见度显著升高;而在7月23日后,随着灰霾天的形成,悬浮颗粒物再次大量积聚,能见度受其影响,数值大幅降低.

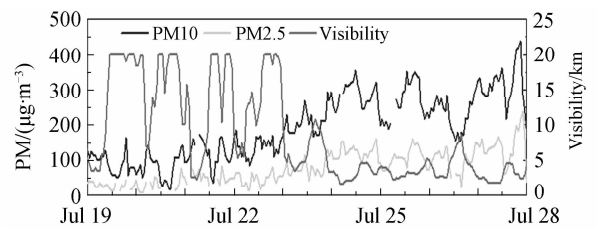


图7 颗粒物浓度与能见度变化趋势

Fig. 7 The variation of PM₁₀, PM_{2.5} concentration and visibility at July 2008

3 结论

本文以双波长三通道拉曼激光雷达、振荡天平(PM₁₀、PM_{2.5})、碳黑气溶胶分析仪及能见度仪相结合,实时连续地观测了2008年北京奥运会前期典型天气状况,并对各测量结果进行了对比分析.观测结果表明,北京奥运会前期天气呈现典型的灰霾天现象,雷达数据分析与地面颗粒物测量结果具有直接的相关性,而能见度的变化趋势正好相反,在灰霾天条件下,能见度可低至1.5 km左右.通过各种测量仪器间的对比、补充与结合,不仅为奥运会的空气质量保障提供了及时准确的预测和风险评估数据,而且更进一步的验证了我国具有自主知识产权的科技创新成果,为我国城市大气复合污染控制提供技术和方法,为城市空气污染治理提供科学依据和参考.

参考文献

- [1] LIU Cheng, MING Hai, WANG Pei, *et al.* Measurements of the aerosol over naqu of tibet and suburb of beijing by micro pulse lidar (MPL) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 5341-9341.
刘诚,明海,王沛,等.西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的微脉冲激光雷达测量[J].光子学报,2006,**35**(9):5341-9341.
- [2] HAN Dao-wen, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, *et al.* Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(11):7651-3751.
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):7651-3751.

- [3] JAMES D K. Lidar inversion with variable backscatter/ extinction ratios [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(11): 1638-1643.
- [4] JAMES D K. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 211-220.
- [5] ALBERT A, ULLA W, MAREN R, *et al.* Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(33): 7113-7131.
- [6] ULLA W, ALBERT A. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(3): 511-514.

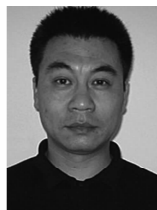
Observation and Research on the Typical Atmosphere of Beijing Olympic Game by Raman Lidar

TONG Yan-chao, LIU Wen-qing, ZHAO Nan-jing, LIU Jian-guo, WU De-xia,
DONG Yun-sheng, LU Yi-huai

(Key laboratory of environmental optics & technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The preceding typical atmosphere of Beijing Olympic Game were measured and analyzed in combine with Raman Lidar, Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM), Black Carbon (BC) and Visibility analyzer from July 19 to July 28 in 2008. The vertical profile and spatio-temporal distribution of aerosol extinction coefficient was shown, and the ratio of aerosol extinction and backscatter was calculated. The relationship of visibility, PM₁₀, PM_{2.5}, BC and aerosol extinction coefficient was analyzed with the data of visibility and mass concentration of particle matter at atmospheric haze. The result shows that there has direct correlation of visibility, mass concentration of particle matter and aerosol extinction coefficient. The technique and method can be provided for controlling the composite pollution of atmosphere based on data comparison, complementary and enrichment of different instrument, and the scientific basic and reference can be provided for treatment of urban air pollution.

Key words: Raman lidar; Aerosol; Extinction coefficient; Mass concentration of particle matter; Visibility



TONG Yan-chao was born in 1973. He studied for his Ph. D. degree in Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main work focuses on the aerosol and dust storm measurement with lidar technique, the air quality analysis, classification and estimate method.



LIU Wen-Qing born in 1954, Ph. D., Professor. His research currently emphasis focus on differential optical absorption spectroscopy, tunable diode laser absorption spectroscopy, laser induced fluorescence, lidar and FTIR for pollution monitoring applications.