

文章编号: 0258-7025(2006)09-1255-05

激光雷达监测北京城区夏季边界层气溶胶

杨 辉^{1,2}, 刘文清¹, 刘建国¹, 陆亦怀¹, 韩道文¹, 虞 统³

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)
(² 新星应用技术研究, 安徽 合肥 230031; ³ 北京市环境保护监测中心, 北京 100044)

摘要 运用一种新型边界层气溶胶监测激光雷达, 在北京丰台区进行了外场实验, 探讨了大气边界层(PBL)内气溶胶消光系数与湿度、风速等气象条件的关系, 并给出了消光系数的时空分布。实验结果表明, 水平大气气溶胶消光系数与黑碳质量浓度、地面风速等近地气象因子均有较好的相关性; 边界层气象因子直接影响气溶胶的时空扩散和分布; 在近地面风速较小等条件下, 北京城区气溶胶污染在凌晨和上午较下午和前半夜严重。

关键词 激光雷达; 大气边界层; 气溶胶; 黑碳; 相关

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Urban Planetary Boundary Layer Aerosol Monitoring by Lidar at Beijing

YANG Hui^{1,2}, LIU Wen-qing¹, LIU Jian-guo¹, LU Yi-huai¹, HAN Dao-wen¹, YU Tong³

¹Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²New Star Research Institute of Applied Technology, Hefei, Anhui 230031, China
³Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100044, China

Abstract Beijing outfield experiments have been conducted with a new planetary boundary layer (PBL) aerosol monitoring lidar in the summer. The relations of black carbon mass concentration and near ground wind speed to aerosol extinction coefficient are analyzed, and the space-time distributions of aerosol extinction coefficient are also presented in this paper. The results indicate that: the correlations of black carbon mass concentration and near ground wind speed to aerosol extinction coefficient are good; the near ground weather conditions can affect the space-time diffusion and distribution of aerosol; the aerosol pollution during wee hours and morning is serious than in the afternoon and late at night. The results can be referenced for environment management.

Key words laser lidar; planetary boundary layer; aerosol; black carbon; correlation

1 引 言

大气边界层(PBL)通常是指受地面直接影响、并与地面有直接作用的对流层,是和人类关系最为密切的一层,是人类活动和各项生态环境构成的主要气层,它响应地面作用的时间尺度为1 h或更短^[1,2]。气溶胶是指液态或固态微粒均匀散布在气

体中形成的相对稳定的悬浮体系,其粒径区间为0.001~100 μm,在诸多的大气过程中扮演着重要角色,是大气边界层的垂直结构和时空变化观测的天然载体^[3,4]。大气边界层内气溶胶对地面气候、大气温度、气压场、风场和垂直运动场等都有明显影响^[5]。激光雷达是探测大气边界层气溶胶垂直分布的主要工具之一,并广泛应用于激光大气传输、全球

收稿日期:2005-11-16; 收到修改稿日期:2006-02-08

基金项目:国家 863 计划(2005AA64100)资助项目。

作者简介:杨 辉(1974—),男,四川德阳人,中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室博士研究生,主要从事激光雷达研制和大气环境监测、光电子技术等研究。E-mail:hyang@aiofm.ac.cn

导师简介:刘文清(1954—),男,安徽蚌埠人,中国科学院安徽光学精密机械研究所所长,研究员,博士生导师,主要从事新型环境监测技术、痕量气体、水体、目标散射特性等的光学与光谱学监测方法、机动车尾气在线监测技术等研究和相应的监测仪器研发工作。E-mail:wqliu@aiofm.ac.cn

气候预测、气溶胶辐射效应及大气环境等研究领域。

利用激光雷达对城区大气边界层中的气溶胶粒子进行监测具有极高的科学意义和现实价值。本文对城市大气污染时空分布光学监测技术系统与示范工程中的激光雷达测量数据进行了分析和讨论,探讨了大气边界层气溶胶消光系数与湿度、风速等气象条件的关系,并给出了消光系数的时空分布。实验地点位于北京市丰台区丰台图书馆附近的聚丰宾馆六楼顶(39°51.558'N,116°16.551'E),观测起止时间为2005-08-13~2005-09-09。

2 气溶胶监测激光雷达的结构

气溶胶监测激光雷达结构示意图如图1所示。气溶胶监测激光雷达采用了独特的发射和接收光学单元,具有结构紧凑、体积小、重量轻、自动化程度高、探测速度快等优点,可应用于大气边界层内气溶胶和其他环境要素的监测。其主要技术参数见表1。

表 1 气溶胶监测激光雷达的主要技术参数

Table 1 Main specifications of PBL aerosol monitoring lidar

Nd:YAG laser	
Wavelength /nm	532
Pulse energy /mJ	30
Pulse duration /ns	6
Repetition /Hz	20
Receiving optics	
Telescope	Cassegrain
Diameter /mm	200
Field of view /mrad	2
Filter	
Central wavelength /nm	532
Bandwidth /nm	2
Detector	
PMT	Hamamatsu R3896, side-on type
Amplifier	612A/AM
Data acquisition and processing	
Digitizer card	Gage CS1450, 50M, 14 bits

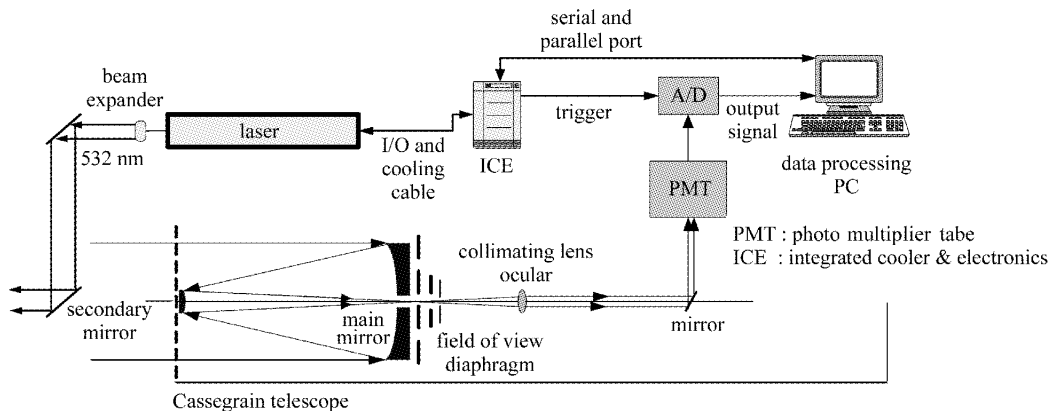


图 1 气溶胶监测激光雷达的结构

Fig. 1 Schematic diagram of PBL aerosol monitoring lidar

3 激光雷达方程

在一次散射的条件下,米散射型激光雷达方程可表示为

$$X(z) = P_z \cdot z^2 = C\beta(z) \exp\left[-\int_0^z 2\sigma(z) dz\right] = C[\beta_a(z) + \beta_m(z)] \exp\left\{-2\int_0^z [\sigma_a(z) + \sigma_m(z)] dz\right\}, \tag{1}$$

式中 P_z 为激光雷达接收探测距离 z (km) 处的大气后向散射回波信号(W); C 为系统常数($W \cdot km^3 \cdot sr$); $\beta(z), \sigma(z)$ 分别为距离 z 处大气总的后向散射系数($km^{-1} \cdot sr^{-1}$) 和消光系数(km^{-1}), $\beta(z) = \beta_a(z)$

+ $\beta_m(z), \sigma(z) = \sigma_a(z) + \sigma_m(z)$, 下标 a, m 分别表示气溶胶和空气分子。

对单波长激光雷达,采用 Fernald^[6]法来反演气溶胶监测激光雷达的垂直测量数据。反演时,取气溶胶消光后向散射比 $S_a = 50 sr$,大气分子的消光后向散射比 $S_m = 8\pi/3 sr$,大气分子的消光系数 $\sigma_a(z)$ 使用 30°N 夏季美国温湿压标准大气模式,并由分子瑞利散射理论计算得到。

4 气溶胶监测激光雷达的几何重叠系数

由图1可知,气溶胶监测激光雷达系统利用两

个 45° 反向镜,使激光器发射的激光束和接收望远镜实现了同轴。激光束光斑直径大小约为 15 mm,光束发散角经扩束后为 0.3 mrad,而望远镜直径为 200 mm,望远镜视场为 2 mrad,故理论上气溶胶监测激光雷达的几何重叠系数恒为 1,即激光器出射的激光始终在望远镜的视场内。但由于望远镜前部有一导光镜,加之发射激光束与接收望远镜光轴一致性存在极小的偏差,故对气溶胶监测激光雷达的近距离信号进行几何重叠系数的校正是必要的。

对 2005-08-28 晚的 6000 组雷达水平测量大气回波数据进行了处理,得到了如图 2 所示的气溶胶监测激光雷达几何重叠系数曲线。由图可知,气溶胶监测激光雷达发射出的激光束在 350~400 m 左右的距离上才能完全被望远镜接收到,这可通过减少 45° 导光镜的面积来减少气溶胶监测激光雷达的重叠距离。同时,在 400 m 以后重叠系数曲线有小幅度下降,这主要是由发射激光束与接收望远镜光轴的一致性偏差所引起的。

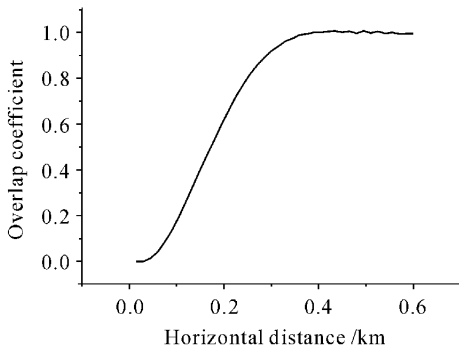


图 2 气溶胶监测激光雷达几何重叠系数曲线
Fig. 2 Overlap coefficient curve of PBL aerosol monitoring lidar

5 气溶胶监测激光雷达的水平消光系数观测结果与分析

对式(1)取对数并进行距离微分可得

$$\frac{d[\ln X(z)]}{dz} = \frac{1}{\beta(z)} \cdot \frac{d\beta(z)}{dz} - 2\alpha(z), \quad (2)$$

在激光雷达水平探测时,在满足大气水平均匀条件下,大气后向散射距离微分为 0,即 $\frac{d\beta(z)}{dz} = 0$,而

$\alpha(z)$ 为常数,可得大气水平消光系数

$$\alpha_H = -\frac{1}{2} \frac{d[\ln X(z)]}{dz}. \quad (3)$$

大气扩散的理论和实践研究表明,在不同的气象条件下,尤其是在不稳定大气条件下,大气边界层

内气溶胶的浓度可相差几十倍乃至几百倍。

5.1 水平消光系数与黑碳质量浓度相关分析

黑碳气溶胶是大气气溶胶中一种重要组成部分,主要是含碳物质不完全燃烧产生的不定型碳质,工业污染、汽车尾气、森林大火以及城乡居民的小炉灶、秸秆燃烧等都会产生大量黑碳微粒。黑碳气溶胶在可见到红外波段范围内对太阳辐射均有强烈的吸收,它是大气气溶胶中强光学吸收组分。黑碳气溶胶颗粒的粒径尺度范围一般在 0.01~1 μm,其粒径中值为 0.1~0.2 μm。积聚模态的黑碳气溶胶还可以通过呼吸作用,夹带所吸附的多环芳烃类等有毒物质进入人体,对公众健康造成危害^[7,8]。

将气溶胶监测激光雷达水平放置,利用激光雷达方程的斜率反演方法,即可测量水平消光系数 α_H 与水平能见度。同时,利用黑碳监测仪可测量出黑碳的质量浓度,图 3(a)为 2005-08-30 17:00~2005-08-31 17:00 测量时段内的气溶胶监测激光雷达水平消光系数与黑碳质量浓度的分布廓线,图 3(b)显示了该时段内两种测量数据的相关关系。

从图 3(b)可以看出,在测量期间,气溶胶监测激光雷达水平测量的气溶胶消光系数与黑碳质量浓度有较好的相关性,相关度达到了 0.84,这说明在北京城区的气溶胶成分中,黑碳细粒子占有较大的比

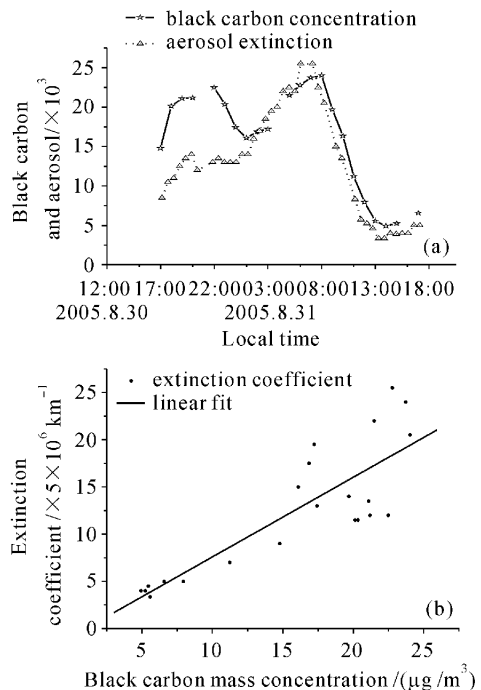


图 3 气溶胶水平消光系数与黑碳质量浓度的时间分布
Fig. 3 Time distribution of aerosol horizontal aerosol extinction coefficient and black carbon mass concentration series

重。

另外,从图 3(a)中还可看出,在该测量时段,黑碳质量浓度和气溶胶消光系数的日变化与北京的天气气候特征相吻合,即峰值出现在前半夜和早晨车辆高峰期,而最小值均出现在午后 13:00 时左右。

5.2 水平消光系数与地面风向风速相关分析

周丽等^[9]指出,气象因子对气溶胶的浓度分布有很大的影响。风速减小、层结稳定性增加、湿度增大等可导致气溶胶总悬浮颗粒物及其化学组分浓度增高。大气低层风向、风速影响着污染物的传输及扩散过程,风的主要作用是对污染物的平流输送,通常风速越大越有利于空气中污染物质的稀释扩散。而长时间的微风或静风则会抑制污染物的扩散,使近地面层的污染物浓度成倍增长。

图 4(a)为 2005-09-06 08:00~2005-09-07 08:00 测量期间的风向风频统计图,图 4(b)标明相应时段内的气溶胶消光系数与地面风速的相关关系。从图 4(a)可以看出,该时段内北京测站处于东北风带,故气溶胶消光系数能维持在较高的水平,同时,从图 4(b)可以看出,大气气溶胶消光系数与地面风速的相关性达到了-0.78,这与文献[9,10]中的结论是一致的。

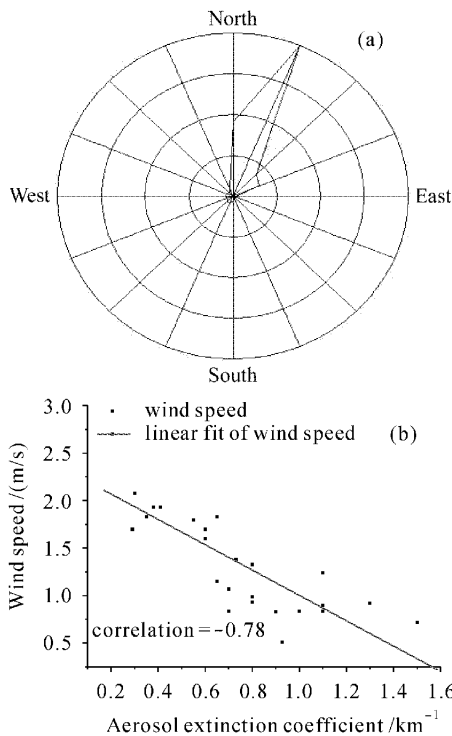


图 4 气溶胶监测激光雷达水平消光系数与风向、风速的关系

Fig. 4 Correlation of horizontal aerosol extinction coefficient and wind speed, wind direction

6 气溶胶监测激光雷达探测大气边界层气溶胶的时空结构

大气边界层高度是近地面大气对流混合所能达到的高度,它与上面自由大气层交界部分为一逆温层。通常,在逆温层下部的大气边界层内聚集着大量的气溶胶粒子,层内水气含量也十分丰富,相对湿度较大。而在逆温层上部的自由大气中,气溶胶和水气含量则迅速减少。利用这一特点,可使用激光雷达探测大气边界层的高度。本文利用激光雷达消光系数的时空分布,绘出了大气边界层内气溶胶的时空结构,如图 5(a),(b)所示。

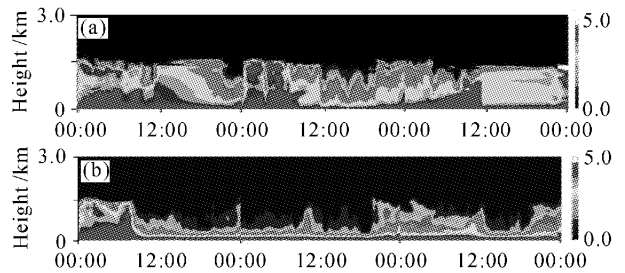


图 5 2005-08-21 00:00~2005-08-24 00:00(a)与 2005-09-01 00:00~2005-09-04 00:00(b)期间气溶胶监测激光雷达消光系数时空分布的渲染图

Fig. 5 Extinction coefficient space-time distributions of PBL aerosol monitoring lidar during 2005-08-21 00:00~2005-08-24 00:00 (a) and 2005-09-01 00:00~2005-09-04 00:00 (b)

从图 5(a),(b)可以看出:

1) 北京城区大气边界层内的气溶胶分布具有明显的多层结构,且富有变化。边界层内气溶胶污染大多聚集在 0.8 km 高度以下,在 2005-08-21,22 日凌晨及 2005-09-01 日凌晨除近地面存在较厚的气溶胶污染层外,在监测站上空约 1.0~1.2 km 高度处还存在着浓度较高的气溶胶污染团,这主要是监测站以北约 1 km 处有一烟囱,在风力作用下,其高浓度污染源扩散到了监测站上空;

2) 在 2005-08-21~2005-08-24 和 2005-09-01 的凌晨 00:00~中午 12:00,边界层内的气溶胶浓度较高,且气溶胶污染层较厚,且气溶胶污染层的高度较高,这主要是因为该期间内的大气边界层结较稳定,且测站处的风向为东北方向,风速为 2 级以下,由工业生产和机动车尾气产生的气溶胶污染粒子大部被抑制在边界层内;

3) 2005-09-02~2005-09-03 两天的边界层内的

气溶胶污染层高度明显降低,这主要是因为在北京 2005-09-01 08:00~2005-09-02 16:00 期间北京市区在东北风带的强烈作用下,地面风速明显增大(如图 6 所示),导致了边界层内气溶胶和其他污染元素的急剧扩散,相应的浓度也迅速降低。

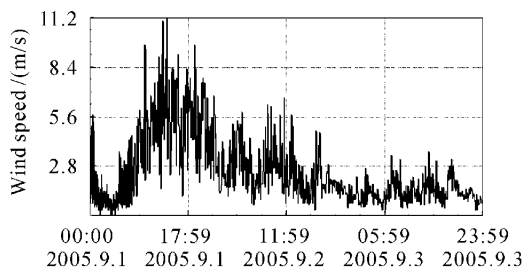


图 6 地面风速时间序列

Fig. 6 Wind speed series on ground at Beijing

7 结 论

介绍了一种新型边界层气溶胶监测激光雷达的总体结构,对北京外场实验的结果进行了分析和讨论,结果表明,水平大气气溶胶消光系数与黑碳质量浓度有较好的相关性(相关度 0.84),这说明北京城区的气溶胶成分中,由汽车尾气的排放、工业生产及其二次污染生成的气溶胶黑碳细粒子占有较大的比重;水平大气气溶胶消光系数与地面风速的相关性达到了-0.78,说明地面风速能影响气溶胶消光系数的水平扩散;地面气象条件能直接影响气溶胶的时空扩散和分布;在近地面风速较小等条件下,北京城区气溶胶污染在凌晨和上午较下午和前半夜严重。

参 考 文 献

1 Roland B. Stull. An Introduction to Boundary Layer

Meteorology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 2~3

2 Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. Recent process of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2003, 27(4):712~728

胡 非,洪钟祥,雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(4):712~728

3 Liu Yi, Wang Mingxing, Zhang Renjian. The present status of aerosol research in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(4):40~414

刘 毅,王明星,张仁健. 中国气溶胶研究进展[J]. *气候与环境研究*, 1999, 4(4):406~414

4 Liu Qiang, Wang Mingxing, Li Jing *et al.*. Present research on atmospheric aerosol and trends [J]. *China Power Science and Technology*, 1999, 5(3):17~23

刘 强,王明星,李 晶等. 大气气溶胶研究现状和发展趋势[J]. *中国粉体技术*, 1999, 5(3):17~23

5 Qian Yongpu. Study of climate effect of PBL aerosol [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1994, 17(2):141~147

钱永甫. 边界层气溶胶气候效应的研究[J]. *南京气象学院学报*, 1994, 17(2):141~147

6 Frederick G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation; some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(5):652~655

7 Qin Shiguang, Tang Jie, Wen Yupu *et al.*. Black carbon and its importance in climate change studies [J]. *Meteorological Monthly*, 2001, 27(11):3~7

秦世广,汤 洁,温玉璞等. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. *气象*, 2001, 27(11):3~7

8 T. Novakov, M. O. Andreae, R. Gabriel *et al.*. Origin of carbonaceous aerosol over the tropical Indian ocean; biomass burning or fossil fuels? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(24):4061~4064

9 Zhou Li, Xu Xiangde, Ding Guoan *et al.*. Correction factor estimation model of PM_{2.5} particle concentration at Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(6):761~767

周 丽,徐详德,丁国安等. 北京地区气溶胶 PM_{2.5} 粒子浓度的相关因子及其估算模型[J]. *气象学报*, 2003, 61(6):761~767

10 Lou Shujuan, Mao Jietai, Wang Meihua. Observational study of black carbon aerosol in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(1):17~22

娄淑娟,毛节泰,王美华. 北京地区不同尺度气溶胶中黑碳含量的观测研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(1):17~22