

近地面 PM_{2.5} 质量浓度廓线反演方法及个例研究

陶宗明^{1,2} 单会会¹ 麻晓敏¹ 赵素贵¹ 张辉¹ 史博¹ 刘东² 谢晨波² 王英俭^{2,3}

¹解放军陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031

²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

³中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031

摘要 分析了气溶胶消光系数和 PM_{2.5} 质量浓度之间的关系, 提出了利用电荷耦合器件(CCD)侧向散射激光雷达系统和 PM_{2.5} 颗粒物探测器相结合, 反演 PM_{2.5} 质量浓度廓线的方法。通过个例研究, 得出了在相对湿度变化不大时, 地面上 PM_{2.5} 质量浓度和气溶胶消光系数成线性关系; 分析了 2014 年 4 月 13 日和 2014 年 12 月 16 日合肥西区董铺岛 PM_{2.5} 质量浓度廓线特征: 随时间变化, 在空间上是有结构的, 在紧贴地面有较重的污染物层。探测实验结果表明基于 CCD 的侧向散射激光雷达和 PM_{2.5} 颗粒物探测器相结合是探测近地面污染物质量浓度廓线行之有效的新方法。

关键词 大气光学; 侧向散射激光雷达; 气溶胶消光系数; PM_{2.5} 质量浓度

中图分类号 TN958.98; P407.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.110102

Retrieval Method of PM_{2.5} Mass Concentration Profile in Near-Ground and Case Study

Tao Zongming^{1,2} Shan Huihui¹ Ma Xiaomin¹ Zhao Sugui¹ Zhang Hui¹ Shi Bo¹
Liu Dong² Xie Chenbo² Wang Yingjian^{2,3}

¹Section of Physics Teaching and Research, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

²Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

³University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The relationship between aerosol extinction coefficient and PM_{2.5} mass concentration is analyzed, it is proposed that the PM_{2.5} mass concentration profile can be retrieved by combining the side-scatter lidar system based on charge-coupled device (CCD) and PM_{2.5} detector. From case study, when the variation of relative humidity is small, PM_{2.5} mass concentration is proportional to aerosol extinction coefficient at ground. The characteristic of PM_{2.5} mass concentration profile of near-ground on April 13, and December 16, 2014 at Dongpu island of western suburb of Hefei city is analyzed as changing with time, changing with altitude, and air pollutant concentration is comparatively large in close surface. The experimental results show that the side-scatter lidar system based on CCD combined PM_{2.5} detector is an effective new method of exploring pollutant mass concentration profile in near-ground.

Key words atmospheric optics; side-scatter lidar; aerosol extinction coefficient; PM_{2.5} mass concentration

OCIS codes 010.1310; 290.2200; 040.1520

1 引言

大气气溶胶是悬浮在大气中粒子直径在 0.001~100 μm 之间固体和液体颗粒物的总称, PM_{2.5} 是指直径小于 2.5 μm 的气溶胶粒子, 它是大气中气溶胶的一个重要组成部分。PM_{2.5} 由于其尺度小又称为细颗粒物, 它们的比表面积较大, 和粗颗粒物相比更容易富集有毒物质, 同时它们在大气中停留时间较长, 故其浓度与人体健康密切相关^[1], 它们是大气污染物的重要组成部分。由于它对人体的危害较大, 欧美国家从 20 世

收稿日期: 2015-04-04; 收到修改稿日期: 2015-05-26; 网络出版日期: 2015-09-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41175021, 41475025)

作者简介: 陶宗明(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光雷达研制、激光大气探测等方面的研究。

E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

纪90年代开始对细颗粒物开展了采样和监测,美国于1997年颁发了PM2.5质量浓度的环境标准:日平均值为 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$,年平均值为 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。我国于2012年编制完成的《环境空气质量标准》中也颁布了PM2.5质量浓度的环境标准:日平均值为 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$,年平均值为 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$,与世界卫生组织过渡期第一阶段目标值相同,符合我国目前经济发展阶段和环境管理的需求。近年来,中国对大城市的气溶胶细颗粒物研究已经展开,许多研究机构对细颗粒物相继进行了一系列的实验和监测^[2],结果表明中国的PM2.5质量浓度有增加的趋势。同时,PM2.5通过消光作用造成大气的能见度下降,影响交通安全。

当前,直接测量PM2.5质量浓度主要是利用颗粒物探测仪,它们只能布置在有限点进行测量。如徐敬等^[3]在北京白石桥地区的北京舞蹈学院和中国气象局培训中心的主教学楼楼顶放置颗粒物质量监测仪进行观测PM2.5质量浓度;其他的一些研究小组则把仪器分别放置在天津250 m和北京325 m气象铁塔上进行近地面层PM2.5质量浓度垂直分布特征的研究^[4-6]。

后向散射激光雷达是探测大气气溶胶时空分布的强有力手段,已被广泛利用^[7-11]。但后向散射激光雷达由于有几何因子的存在^[12],在近距离范围内有一定的误差,还可能有一个盲区。侧向散射激光雷达是国际上正在研究的一种新技术^[13-14],它将发射装置与接收装置分两处放置,避免了后向散射激光雷达中几何因子的影响,在近距离段测量精度大大提高,同时由于使用的侧向技术,其空间分辨率在近距离段也很高。这两个优点很适合用来测近地层的大气气溶胶空间分布。

激光雷达测量的是大气气溶胶整体的光学行为,在一定程度上可以反映大气污染物的浓度^[15-16]。本文利用自行研制的侧向散射激光雷达系统反演出从地面开始的气溶胶消光系数高度廓线,融合地面同时同地点颗粒物探测仪探测到的PM2.5质量浓度数据,获得从地面开始的PM2.5质量浓度高度廓线。

2 系统简介

探测系统由侧向散射激光雷达子系统和PM2.5颗粒物探测仪组成,图1是其示意图。其中侧向散射激光雷达子系统由发射、接收、几何标定和采集控制计算机等部分组成。发射光源为Nd:YAG激光器,输出波长为532 nm的脉冲激光,重复频率为10 Hz。侧向散射光被CCD相机接收,其像素为 $3352 \text{ pixel} \times 2532 \text{ pixel}$,曝光时间由需要设定,在CCD镜头前加装了带宽为30 nm的干涉滤光片,以提高信噪比。利用几何标定装置,确定CCD相机中的像素与光束上各散射点的一一对应关系。采集控制计算机采集CCD成像的回波信号和控制激光器、CCD相机的工作时序。图1中 z 为探测距离, D 为CCD相机到光束的垂直距离, θ 为散射角, $d\theta$ 为像素对应的张角。详细的侧向激光雷达子系统技术参数参见文献[17]。

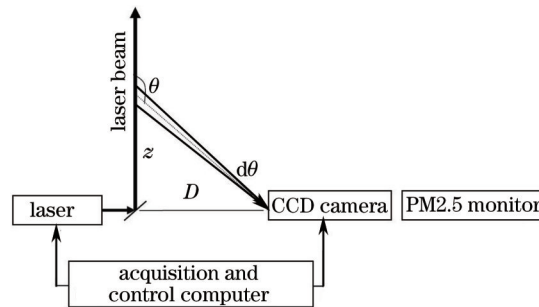


图1 探测系统示意图

Fig.1 Diagram of measurement system

3 反演方法

3.1 气溶胶消光系数反演方法

侧向散射激光雷达方程可表示为^[18]

$$P(z, \theta) = \frac{P_0 K A}{D} \left[\frac{\beta_1(z, \pi)}{f_1(\pi)} f_1(\theta) + \frac{\beta_2(z, \pi)}{f_2(\pi)} f_2(\theta) \right] \cdot \exp[-\tau - \tau / \cos(\pi - \theta)] d\theta, \quad (1)$$

式中 P_0 是激光器的单脉冲能量, K 是系统常数, A 是镜头的面积, $\beta(z, \pi)$ 是后向散射系数, $f(\theta)$ 为相函数,下标1和2分别表示气溶胶和大气分子, τ 是光学厚度,它是消光系数 $\alpha(z)$ 的函数, $\tau = \int_0^z [\alpha_1(z') + \alpha_2(z')] dz'$ 。

分子的相函数、后向散射系数和消光后向散射比可由大气模式和理论计算得到,气溶胶的相函数可由太阳辐射计反演而得,气溶胶消光后向散射比可根据经验而得,那么在(1)式中只剩下气溶胶的消光系数一个变量了。若光路上某处的气溶胶后向散射系数由其他方法得到,就选该点为参考点,高度记为 z_c ,则由(1)式结合文献[18]中提出的反演方法,就可得出不同高度上气溶胶消光系数廓线。

3.2 质量浓度廓线反演方法

PM2.5颗粒物探测仪测出的质量浓度与激光雷达反演出的气溶胶消光系数之间存在一定的关系。气溶胶尺度谱分布函数 $n(r)$,被定义为单位体积中在半径 $r \rightarrow r + dr$ 区间内的粒子数 dN 与 dr 的比值,即

$$n(r) = \frac{dN}{dr}, \quad (2)$$

大气中颗粒物总浓度 C_{Total} 可定义为

$$C_{\text{Total}} = \int_0^{\infty} \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) n(r) dr, \quad (3)$$

式中 ρ 为气溶胶质量密度。PM2.5的质量浓度 $C_{\text{PM2.5}}$ 定义为

$$C_{\text{PM2.5}} = \int_0^{2.5 \mu\text{m}} \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) n(r) dr. \quad (4)$$

在一次散射的近似条件下,气溶胶消光系数 α 的定义为

$$\alpha = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{\text{ext}} n(r) dr, \quad (5)$$

式中 Q_{ext} 为消光效率因子。引入粒子有效半径 $r_{\text{eff}} = \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr / \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr$,粒子谱的整体消光效率 \bar{Q}_{ext} 和平均密度 $\bar{\rho}$ 等物理量后,可得到消光系数与颗粒物浓度之间的关系式为

$$\alpha = \frac{3\bar{Q}_{\text{ext}}}{4r_{\text{eff}}\bar{\rho}} C_{\text{Total}}. \quad (6)$$

在大气边界层内,由于混合均匀, $k = C_{\text{Total}}/C_{\text{PM2.5}}$,是不随高度变化而随时间变化的质量浓度比,由此可得气溶胶消光系数与PM2.5质量浓度的关系式为

$$\alpha = \frac{3\bar{Q}_{\text{ext}}k}{4r_{\text{eff}}\bar{\rho}} C_{\text{PM2.5}} = K \cdot C_{\text{PM2.5}}, \quad (7)$$

式中 $K = \frac{3\bar{Q}_{\text{ext}}k}{4r_{\text{eff}}\bar{\rho}}$,为比例系数。(7)式是把消光系数廓线转化为PM2.5质量浓度廓线的理论依据。

在(7)式中,比例系数 K 是由谱分布、折射率指数等气溶胶参数决定的常数。在近地面边界层内,由于湍流的混合作用,可合理地认为边界层内气溶胶粒子的谱分布和折射率指数是相同的,故比例系数 K 在不同的高度上也是相同的,是不随高度变化的常数。但比例系数 K 可随时间和地点变化,因为在不同的天和不同地点,大气气溶胶的谱分布、折射率指数等参数可以是不一样的。

在一次测量中,气溶胶的来源可认为不变,不同高度上的气溶胶消光系数不同是由气溶胶的总粒子数不同而引起的。在图1中,侧向散射激光雷达和PM2.5颗粒物探测仪组成的系统在同一地点同时工作,PM2.5颗粒物探测仪测量仪器所在高度上的PM2.5质量浓度,CCD侧向散射激光雷达探测到不同高度上的消光系数廓线。通过颗粒物探测仪所在高度上的PM2.5质量浓度和消光系数,利用(7)式,可算出比例关系 K 。再利用这一比例关系,把消光系数廓线转化为PM2.5质量浓度廓线,从而获得近地面层PM2.5质量浓度随高度变化关系。

4 探测个例

本文的探测系统座落在合肥市的董铺岛上,董铺岛位于合肥市的西郊,距市中心约15 km,该岛三面被董铺水库所环绕,相对湿度比其他地方大。为了便于数据分析,个例选取的条件是晴朗天气、有微风。2014年4月13日和12月16日两个夜晚,都是晴朗、微风的天气。本文就选这两个晚上的探测为个例,侧向散射激光雷达的工作方式是每隔10 min采集一组数据,2014年4月13日晚,侧向散射激光雷探测时间是20:00~23:00;2014年12月16日晚,侧向散射激光雷探测时间是从20:00至次日06:00。所在地合肥市环保局PM2.5颗粒物探测仪是日常工作仪器,一直连续工作,每小时给出一组地面PM2.5质量浓度平均数据。

图2是两个个例中3个整点时刻近地面PM2.5质量浓度高度廓线,从图中可看出PM2.5质量浓度随时间和高度变化的一些特点:1) PM2.5质量浓度在近地面的廓线是有结构的。从每一廓线来看,近地面PM2.5质量浓度在高度上并不均匀,尤其是200 m以下的范围内,随着高度的增加PM2.5质量浓度快速变小。2) PM2.5质量浓度在近地面的廓线是随时间变化的。图2(a)中在0.2 km以下和1 km高度左右随时间变化比较明显,在2 km以上高度PM2.5质量浓度几乎不随时间变化;图2(b)中除了1.5~2.0 km范围外,其他高度上随时间变化都比较明显。

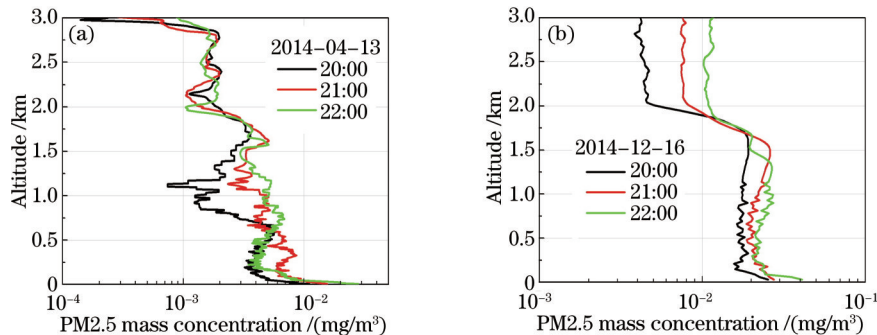


图2 近地面PM2.5质量浓度的高度廓线。(a) 2014年4月13号; (b) 2014年12月16号

Fig.2 Near surface profiles of PM2.5 mass concentration. (a) On Apr. 13, 2014; (b) on Dec. 16, 2014

为了研究PM2.5质量浓度廓线的变化细节,图3分别画出了2014年4月13日20:00~23:00和2014年12月16日整晚(从16日20:00至次日06:00)的变化情况。图3(a)的时间间隔是10 min,其中地面上每隔10 min的PM2.5质量浓度由每小时平均浓度插值而得到;图3(b)的间隔是1 h。

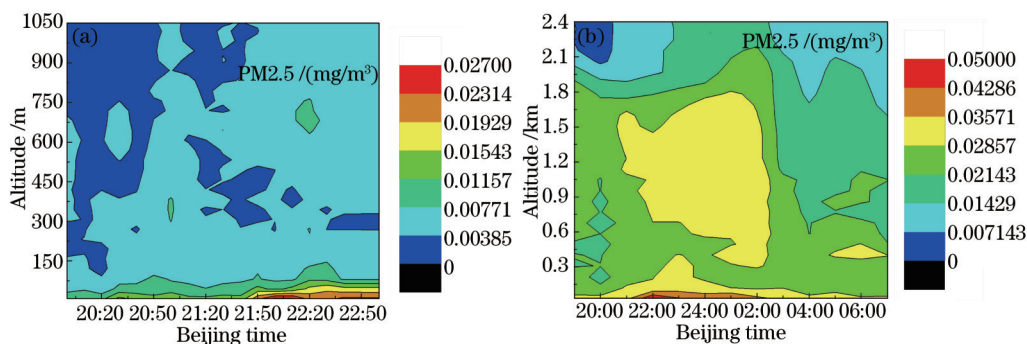


图3 连续PM2.5质量浓度高度廓线探测。(a) 2014年4月13号; (b) 2014年12月16号

Fig.3 Continuous profile measurements of PM2.5 mass concentration. (a) On Apr. 13, 2014; (b) on Dec. 16, 2014

从图3中可以看到,紧贴地面有一层较重的污染层,其PM2.5质量浓度在时间和空间上的一些细节变化特征:1) 在图3(a)中,这层气溶胶的PM2.5质量浓度从20:00的0.011 mg/m³增加至22:00的0.028 mg/m³;到22:10之后降至0.023 mg/m³;之后浓度近似不变。在空间方面,这层气溶胶的高度从20:00时的40 m逐渐升高到22:30的150 m,之后随着时间的推移又逐渐降低。2) 图3(b)探测时间是整个夜晚,PM2.5质量浓度最大值出现在22:00,其值为0.049 mg/m³。在21:00至次日02:00之间,在0.6~1.5 km的高度上,有一层悬浮的污染层,其PM2.5质量浓度约为0.030 mg/m³。

5 结果分析

5.1 相关性分析

为了更好地进行侧向散射激光雷达反演气溶胶的消光系数和PM2.5颗粒物探测仪的数据比较分析,对侧向散射激光雷达反演的气溶胶的消光系数按小时进行平均,然后把高度为15 m处的气溶胶平均消光系数值与PM2.5质量浓度平均值进行对比。图4(a)是2014年4月13日两种仪器测量值每小时平均值结果的相关性分析,图4(b)是2014年12月16日晚两种仪器测量值每小时平均值结果的相关性分析。

从图4可以看出,地面上15 m高度处的气溶胶消光系数与地面上的PM2.5质量浓度相关性很好,图4(a)中相关系数达到0.99,图4(b)中相关系数达到0.92。这一结果表明,在上述两个个例探测实验中,(7)式中

K 近似是常数,但其大小不同。其物理意义为在一次持续几小时的探测期间,气溶胶的谱分布和折射率指数等参数是可以认为不变的,理论上推导出的PM2.5质量浓度与气溶胶消光系数关系(7)式是成立的。

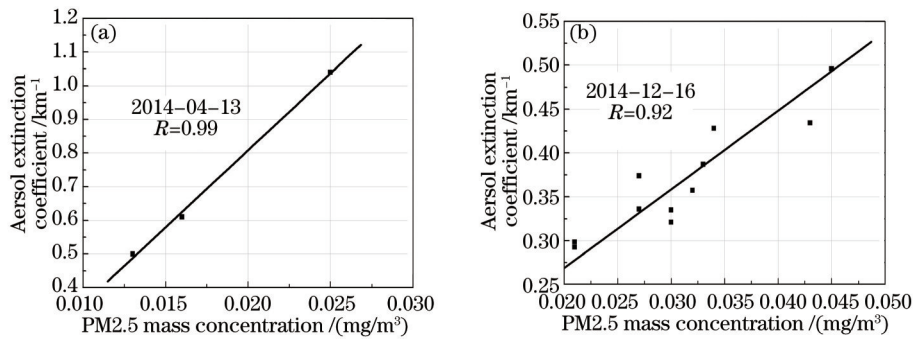


图4 气溶胶消光系数与PM2.5质量浓度相关性。(a) 2014年4月13号; (b) 2014年12月16号

Fig.4 Correlation between aerosol extinction coefficient and PM2.5 mass concentration.

(a) On Apr. 13, 2014; (b) on Dec. 16, 2014

5.2 相对湿度的影响

PM2.5颗粒物探测仪的工作原理是对吸入的大气进行先烘干,然后通过滤膜获得直径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子,最后进行称重。由此可知,PM2.5质量浓度与大气相对湿度无关。但气溶胶消光系数与相对湿度关系较密切,当相对湿度较大时,气溶胶粒子吸湿增长,引起气溶胶总的消光效率增强,导致消光系数增大;当相对湿度较小时,气溶胶粒子风化引起消光效率减弱,导致消光系数减小。由以上分析可知,(7)式中的比例系数 K 应随相对湿度的增加而变大。

图5是两个个例期间,探测系统所在地的相对湿度(数据来源于所在地的气象站)。图5(a)表明,2014年4月13日的探测期间,相对湿度较大,约从90%增加到95%,由(7)式算出该天的比例系数 K 近似为常数,大小为 $39.4\ \text{km}^{-1}/(\text{mg}/\text{m}^3)$ 。图5(b)是2014年12月16日晚所在地的相对湿度变化图,从中看出相对湿度在50%左右,显然相对湿度比上一个个例小很多。比较图4(a)和图4(b)可知,图4(a)的PM2.5质量浓度比图4(b)小,但图4(a)的气溶胶消光系数却比的图4(b)大,引起这一现象的主要原因是相对湿度不同所造成的。由(7)式算出2014年12月16日的比例系数 K 也近似为常数,大小为 $12.1\ \text{km}^{-1}/(\text{mg}/\text{m}^3)$ 。两个个例中的 K 值变化与理论预期是一致的,即 K 与相对湿度是正相关关系。

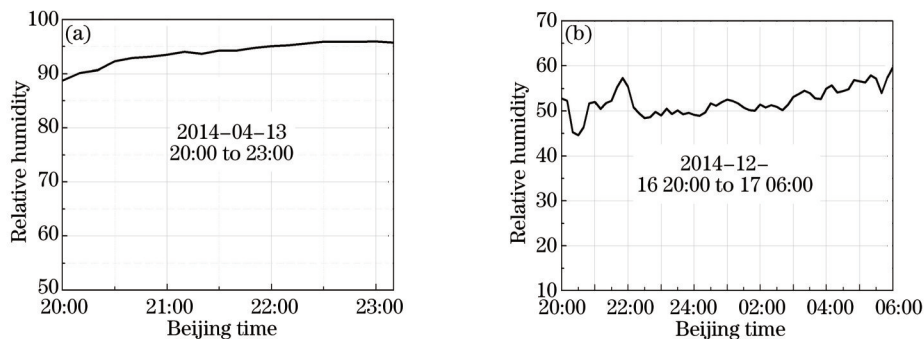


图5 相对湿度与时间关系。(a) 2014年4月13号; (b) 2014年12月16号

Fig.5 Relation between relative humidity and time. (a) On Apr. 13, 2014; (b) on Dec. 16, 2014

上述两个个例中,相对湿度的大小虽然不一样,但每一个个例中,相对湿度随时间变化的范围都不大,故比例系数 K 都可近似为一个常数。实验中还发现,若一次实验中,相对湿度的变化范围较大,则比例系数 K 的波动就较大,故比例系数 K 的大小与相对湿度有关,但是否为常数与相对湿度的变化幅度有关。

6 结 论

PM2.5质量浓度与气溶胶消光系数之间存在着的本质联系,对这一关系进行了理论推导。利用CCD的侧向散射激光雷达系统反演气溶胶的消光系数廓线、利用PM2.5颗粒物探测仪测量地面上的PM2.5质量浓

度,探索出了融合这两种仪器的探测结果反演PM_{2.5}质量浓度廓线的方法。通过个例研究,得出了在相对湿度变化不大时,地面上PM_{2.5}质量浓度和气溶胶消光系数成线性关系;绘制了PM_{2.5}质量浓度廓线及三维时空分布图。得到了2014年4月13日晚和2014年12月16日合肥西区董铺岛近地面PM_{2.5}质量浓度廓线的一些特征:PM_{2.5}质量浓度是随时间变化的,在空间上是有结构的,在紧贴地面有较重的污染层。探测实验结果表明基于CCD的侧向散射激光雷达是探测近地面污染物浓度的一种行之有效的新技术。

参考文献

- 1 An Junling, Zhang Renjian, Han Zhiwei. Seasonal changes of total suspended particles in the air of 15 big cities in northern parts of China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(1): 25-29.
安俊岭, 张仁健, 韩志伟. 北方15个大型城市总悬浮颗粒物的季节变化[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 25-29.
- 2 Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华, 等. 中国大气气溶胶研究综述[J]. *气象学报*, 2002, 60(5): 625-634.
- 3 Xu Jing, Ding Guoan, Yan Peng, *et al.*. Componential characteristics and sources identification of PM_{2.5} in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(5): 645-654.
徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区PM_{2.5}的成分特征及来源分析[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(5): 645-654.
- 4 Wu Zhenling, Liu Aixia, Zhang Changchun, *et al.*. Vertical distribution feature of PM_{2.5} and effect of boundary layer in Tianjin[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2009, 22(4): 24-29.
吴振玲, 刘爱霞, 张长春, 等. 天津大气PM_{2.5}垂直特征及边界层影响[J]. *城市环境与城市生态*, 2009, 22(4): 24-29.
- 5 Yang Long, He Kebin, Zhang Qiang, *et al.*. Vertical distributive characters of PM_{2.5} at the ground layer in autumn and winter in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2): 23-28.
杨龙, 贺克斌, 张强, 等. 北京秋冬季近地层PM_{2.5}质量浓度垂直分布特征[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(2): 23-28.
- 6 Fan Wenyan, Hu Bo, Wang Yuesi, *et al.*. Measurements of the vertical distribution of PM_{2.5} concentration in fog and haze days in Beijing city[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(6): 631-638.
樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测[J]. *气候与环境科学*, 2009, 14(6): 631-638.
- 7 Weitkamp C. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere[M]. New York: Springer, 2005.
- 8 Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance of assessment of CALIOP[J]. *Geophysics Research Letter*, 2007, 34(19): L19803.
- 9 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0113001.
- 10 Wang Zhifei, Liu Dong, Cheng Zhongtao, *et al.*. Pattern recognition model for haze identification with atmospheric backscatter lidars[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1113001.
王治飞, 刘东, 成中涛, 等. 基于模式识别的激光雷达遥感灰霾组分识别模型[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1113001.
- 11 Zhao Hu, Hua Dengxin, Di Huige, *et al.*. Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0113001.
赵虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113001.
- 12 Wang Shaolin, Cao Kaifa, Hu Shunxing, *et al.*. Analysis and determination of lidar geometrical factor[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 147-150.
汪少林, 曹开法, 胡顺星, 等. 对激光雷达几何因子的分析与测量[J]. *激光技术*, 2008, 32(2): 147-150.
- 13 Bernes J E, Bronner S, Becket R, *et al.*. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2647-2652.
- 14 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval of side-scatter lidar signal based on CCD technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201001.
麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于CCD的侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0201001.
- 15 Yang Ting, Wang Zifa, Zhang Bai, *et al.*. Evaluation of the effect of air pollution control during the Beijing 2008 Olympic Games using lidar data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(10): 931-936.
杨婷, 王自发, 张柏, 等. 基于激光雷达数据的奥运大气污染控制效果评估[J]. *科学通报*, 2010, 55(10): 931-936.
- 16 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]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 59-66.

17 Tao Zongming, Liu Dong, Wang Zhenzhu, *et al.*. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1127-1134.

18 Tao Zongming, Liu Dong, Ma Xiaomin, *et al.*. Development and case study of side-scatter lidar system based on charge-coupled device[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3282-3286.

陶宗明, 刘东, 麻晓敏, 等. 基于 CCD 的侧向激光雷达系统研制及探测个例[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3282-3286.

栏目编辑: 史敏