

# 2014 年合肥西郊 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线统计分布

陶宗明<sup>1,2</sup> 麻晓敏<sup>1\*</sup> 刘 东<sup>2</sup> 谢晨波<sup>2</sup> 单会会<sup>1</sup> 赵素贵<sup>1</sup> 张 辉<sup>1</sup> 张清泽<sup>1</sup> 王英俊<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031

**摘要** 反演 PM<sub>2.5</sub> (直径小于 2.5 μm 的颗粒物) 质量浓度廓线, 不仅可以估算污染物的柱浓度, 还可研究污染物在空间的扩散规律, 为防控大气环境污染提供科学支撑。假设在大气边界层内一次 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线的探测过程中, 气溶胶的种类和成分保持不变, 则根据地面上气溶胶消光系数与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度之间的比例关系, 即可把激光雷达反演出的消光系数廓线转化为 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线。分析了两个晚上 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线个例及其随时空变化的情况, 并对 2014 年 3 月至 2015 年 2 月探测到的 82 个晚上的数据按季节进行平均, 获得了 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线的季节平均值。

**关键词** 大气光学; PM<sub>2.5</sub> 质量浓度; 侧向散射激光雷达; 后向散射激光雷达; 气溶胶消光系数

**中图分类号** TN958.98; P407.5 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0601001

## Statistical Distribution of PM<sub>2.5</sub> Mass Concentration Profiles at West Suburb of Hefei City in 2014

Tao Zongming<sup>1,2</sup> Ma Xiaomin<sup>1</sup> Liu Dong<sup>2</sup> Xie Chenbo<sup>2</sup> Shan Huihui<sup>1</sup>

Zhao Sugui<sup>1</sup> Zhang Hui<sup>1</sup> Zhang Qingze<sup>1</sup> Wang Yingjian<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Section of Physics Teaching and Research, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy of PLA, Hefei, Anhui 230031, China

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

<sup>3</sup> School of Environmental Science and Photoelectric Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Retrieving the profile of PM<sub>2.5</sub> (particulate matter less than 2.5 μm in diameter) mass concentration can not only estimate column mass concentration of pollutants, but also follow pollutants diffusion rule in space, so as to provide scientific support for the prevention and control of atmospheric pollution. Suppose that the type and component of aerosol remain unchanged in the period of one PM<sub>2.5</sub> mass concentration detection in the boundary layer, by using the proportional relation between the aerosol extinction coefficient and PM<sub>2.5</sub> mass concentration at ground, the profile of PM<sub>2.5</sub> mass concentration can be obtained from the profile of aerosol extinction coefficient which is retrieved by the lidar system. Two cases of PM<sub>2.5</sub> mass concentration and the characteristic change with altitude and time are analyzed, and the 82 nights data measured from March 2014 to February 2105 are averaged by season. The average profile of seasonal PM<sub>2.5</sub> mass concentration profile is calculated.

**Key words** atmospheric optics; PM<sub>2.5</sub> mass concentration; side-scattering lidar; back-scattering lidar; aerosol extinction coefficient

**OCIS codes** 010.1310; 290.2200; 040.1520

收稿日期: 2015-12-09; 收到修改稿日期: 2016-01-03

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, 主要从事激光雷达技术、激光大气探测方面的研究。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: maxiaomin308515@163.com

## 1 引 言

近年来,城市雾霾天气呈现出频次越来越高和程度越来越严重的趋势。雾霾天气不仅导致能见度下降,影响正常的生产和交通运输,更严重的是,城市雾霾天气中携带了大量的有毒、有害化学成分,对城市人群身体健康造成极大的危害<sup>[1-2]</sup>。大气气溶胶一般是粒径在 0.001~100  $\mu\text{m}$  之间、悬浮在大气中固体粒子和液体颗粒物的总称,PM<sub>2.5</sub>是指粒径小于 2.5  $\mu\text{m}$  的气溶胶粒子(由于其尺度小又称为细颗粒物)。国内外的研究表明,大气中高浓度的细粒子是城市雾霾天气的主要原因。

直接测量 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的仪器是颗粒物质量探测仪,探测方法主要有微量振荡天平法和  $\beta$  射线吸收法等<sup>[3]</sup>。这种仪器是在原位进行探测,不能进行遥感,只能布置在有限点进行测量。徐敬等<sup>[4]</sup>在北京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 PM<sub>2.5</sub> 的探测;吴振玲等<sup>[5-6]</sup>把仪器分别放置在北京 325 m 和天津 250 m 的气象铁塔上不同高度处进行 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度垂直廓线的探测。近年来,还有利用卫星数据和地面仪器相结合的方法来估算近地面的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度<sup>[7-10]</sup>,卫星数据给出整层的气溶胶光学厚度,地面仪器测出所在点的数据,这种结合是一种较好的研究方法。这些研究结果表明 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与卫星数据给出的整层气溶胶的光学厚度有一定的相关性,但相关系数仅在 0.6 左右。这表明单独用气溶胶的光学厚度来表征 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度不是很准确。主要原因在于气溶胶光学厚度是消光系数对高度的积分结果,不是位置的函数;而 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度仅是位置的函数,不是对高度的积分量。为此,李倩等<sup>[11]</sup>对上述方法进行了改进,把气溶胶的光学厚度转化为消光系数并进行湿度订正,得到了“干”气溶胶消光系数与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度之间的统计关系,其相关性得到了提高,可达到 0.8 左右。

后向散射激光雷达是探测大气气溶胶的有力工具<sup>[12]</sup>,但在近距离处存在盲区和过渡区,影响了该距离段的探测精度。侧向散射激光雷达是处于研究中的一项新技术<sup>[13-15]</sup>,它与后向散射激光雷达相结合,可以从地面开始,获得气溶胶消光系数高度廓线,解决了单一后向散射激光雷达探测存在盲区和过渡区的问题<sup>[16-17]</sup>。地面上固定点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的测量很容易实现,而 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度在空间不同高度上的分布测量较为困难。本文集侧向、后向散射激光雷达和地面 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物质量探测仪为一体进行联合探测,找出地面上 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与地面上气溶胶消光系数之间的比例系数,通过这一比例系数把气溶胶消光系数廓线转化为 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的高度廓线。

## 2 仪器与方法

### 2.1 仪器

探测系统包括侧向散射激光雷达、后向散射激光雷达和地面 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物质量探测仪,硬件装置如图 1 所示。其中,侧向散射激光雷达和后向散射激光雷达是联合在一起进行探测的。图 1 中左侧部分的望远镜、光电倍增管(PMT)、瞬态记录仪和激光器等组成后向散射激光雷达系统;中间部分的电荷耦合元件(CCD 相机)、几何定标装置和激光器组成侧向散射激光雷达系统;右侧的 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物探测仪是一个相对独立的部分。整个系统的工作原理:激光器向大气中发射一束激光,由于光束与大气的相互作用,散射光中就包含了大气中 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物的信息;望远镜及光电倍增管探测发射激光路径上各处的后向散射信号强度廓线;CCD 中的像元探测发射激光路径上各处的侧向散射光信号强度廓线;利用后向散射激光雷达方程和侧向散射激光雷达方程反演得出发射激光路径上各点的消光系数廓线。由于后向散射激光雷达在近距离处有探测盲区 and 过渡区,故它主要负责较远距离范围内的探测;侧向散射激光雷达在较远处空间分辨率较小,而在近地面段空间分辨率很高,且探测精度也高,故它主要负责较近距离范围内的探测。结合侧向散射激光雷达和后向散射激光雷达,可实现由地面至对流层顶的高精度探测。放置在激光器处的 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物探测仪记录下该地点的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度;通过地面上 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与气溶胶消光系数的线性关系,可获得 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度在光束方向上的廓线。系统硬件的主要技术参数如表 1 所示,其中 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物探测仪(TEOM 大气颗粒物分析仪)来源于合肥市环保部门在董铺水库的一个采样点(这里的激光雷达系统距离这个采样点不到 200 m),它每小时在网上发布一次 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度探测值。

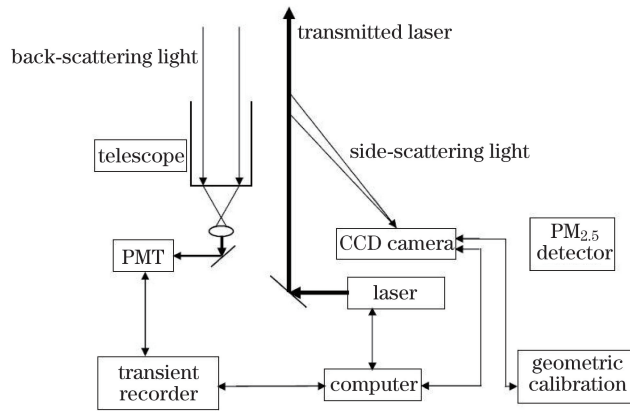


图 1 系统硬件示意图

Fig. 1 Diagram of the combined detection system

表 1 系统硬件的主要技术参数

Table 1 Key specifications of the combined lidar system

Instrument(model)	Parameter	Value
Laser(quantel Brilliant Nd:YAG)	$\lambda$ /nm	532
	Pulse energy /mJ	200
	Repetition rate /Hz	10
	Divergence angle $\theta$ /mrad	0.5
Telescope(Meade Cassegrain LX400-ACF-14")	Diameter $D$ /cm	35.56
	Focal length $f$ /mm	2854
PMT(R7400U-02)	Cathode radiant sensitivity /(mA/W)	80 at 532 nm
Transient recorder(Licel TR-20-160)	Sampling rate /MHz	20
CCD camera(SBIG, ST-8300M)	Pixel array	3352×2532
	Pixel size / $\mu$ m	5.4×5.4
	Angle per pixel /( $^{\circ}$ )	~0.02
	A/D converter /bit	16
	Quantum efficiency	~55% at 532 nm
Computer(Lenovo X200)	Wide-angle lens	Walmexpro $f/2.8$
	Lens focal length /mm	14

## 2.2 方法

### 2.2.1 大气气溶胶消光系数反演方法

后向散射激光雷达反演气溶胶消光系数的方法比较成熟,采用 1984 年 Fernald<sup>[18]</sup> 提出的递推的方法,选择对流层顶附近的清洁点为参考点,设气溶胶的消光-后向散射系数比为 50 sr,就可反演出后向散射激光雷达过渡区上方气溶胶的消光系数廓线。对于侧向散射激光雷达的数据处理,Tao 等<sup>[19]</sup> 提出了一种反演气溶胶消光系数的方法:1)使侧向激光雷达在水平方向上工作,测出大气气溶胶的相函数,或用太阳辐射计测出大气气溶胶的相函数;2)后向散射激光雷达和侧向散射激光雷达的有效探测范围在高度上有一个重叠区域(如本系统中的重叠区域高度约为 0.6~1.5 km),选该区域内任一点为参考点,通过后向散射激光雷达的反演得到参考点的气溶胶消光系数值;3)假设水平方向上测出的相函数同样适用于大气边界层内的垂直方向上,应用递推法即可反演出大气气溶胶的消光系数廓线。

在近距离区域,气溶胶消光系数采用侧向散射激光雷达反演出的数据;在远距离区域,气溶胶消光系数采用后向散射激光雷达反演出的数据;在两激光雷达探测的重叠区域,采用两激光雷达反演出气溶胶消光系数的平均值。将三段数据连接起来即可得到气溶胶消光系数廓线。

### 2.2.2 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度高度廓线反演方法

气溶胶中不同尺度粒子数所占的比例常用尺度谱分布函数  $n(r)$  来描述<sup>[20]</sup>,它被定义为单位体积中在

半径  $r$  到  $r + dr$  区间内的粒子数  $dN$  与  $dr$  的比值

$$n(r) = \frac{dN}{dr}, \quad (1)$$

大气中所有颗粒物总浓度可定义为

$$C_{PM_{10}} = \int_0^{\infty} \rho \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) n(r) dr, \quad (2)$$

PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度  $C_{PM_{2.5}}$  定义为

$$C_{PM_{2.5}} = \int_0^{2.5} \rho \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) n(r) dr, \quad (3)$$

大气中气溶胶消光系数  $\alpha$  定义为

$$\alpha = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{ext} n(r) dr, \quad (4)$$

式中  $Q_{ext}$  为气溶胶消光效率因子。令粒子有效半径  $r_{eff} = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}$ , 粒子谱的整体消光效率为  $\bar{Q}_{ext}$ , 平均密度为  $\bar{\rho}$ , 由(2)式和(4)式可得到消光系数与颗粒物浓度之间的关系为<sup>[11]</sup>

$$\alpha = \frac{3\bar{Q}_{ext}}{4r_{eff}\bar{\rho}} C_{PM_{10}}, \quad (5)$$

令  $f = C_{PM_{10}} / C_{PM_{2.5}}$  为质量浓度比, 由此可得气溶胶消光系数与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的关系为

$$\alpha = \frac{3\bar{Q}_{ext}f}{4r_{eff}\bar{\rho}} C_{PM_{2.5}} = K \cdot C_{PM_{2.5}}. \quad (6)$$

(6)式是把消光系数廓线转化为 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线的理论依据, 式中  $K = \frac{3\bar{Q}_{ext}f}{4r_{eff}\bar{\rho}}$  为比例系数。

在(6)式中, 比例系数  $K$  是由气溶胶的种类、谱分布、折射率指数及大气相对湿度(RH)等参数决定的常数。在近地面的边界层内, 由于湍流的混合作用, 可认为气溶胶的折射率指数是相同的, 气溶胶粒子的谱分布的特征也是相同的。忽略不同高度上大气相对湿度的区别, 可认为比例系数  $K$  在不同的高度上是相同的, 是与高度无关的常数。但比例系数  $K$  可随时间和地点而变化, 因为在不同的时间和不同的地点, 大气气溶胶的来源和相对湿度不同, 这导致大气气溶胶的谱分布及折射率指数等参数不同。

在图 1 中, 侧向散射激光雷达、后向散射激光雷达和 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物探测仪在同一地点同时工作, PM<sub>2.5</sub> 颗粒物探测仪测量仪器所在高度上的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度, 两种激光雷达共同获得不同高度上的气溶胶消光系数廓线。关于激光雷达和 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物探测仪的测量数据的结合, 先利用颗粒物探测仪的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度和所在高度上激光雷达反演出的气溶胶消光系数, 通过(6)式, 可算出比例关系  $K$ ; 再利用这一比例关系, 把这一时刻的气溶胶消光系数廓线转化为 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线, 从而获得从地面开始的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度随高度变化廓线<sup>[20]</sup>。

### 3 结果与分析

2013 年 5 月成功研制了侧向散射激光雷达系统<sup>[21]</sup>, 然后利用此侧向散射激光雷达和后向散射激光雷达在晴天的夜晚同时进行观测实验。在 2014 年 3 月至 2015 年 2 月期间, 共观测了 82 个晚上。下面对这 82 个晚上激光雷达的观测数据和所在地 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物探测仪一年的数据进行综合分析。

#### 3.1 地面上 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度随时间的变化关系

合肥市环保局在激光雷达所在地(董铺水库)设有 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度采样点, 每小时给出一个地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度数据。对 2014 年 3 月至 2015 年 2 月期间夜晚的探测数据, 按年和按季进行了平均(3 月、4 月和 5 月为春季; 6 月、7 月和 8 月为夏季; 9 月、10 月和 11 月为秋季; 12 月、1 月和 2 月为冬季), 结果如图 2 所示, 可



以看出:1)春季  $PM_{2.5}$  质量浓度最小,从 18 点到 23 点, $PM_{2.5}$  质量浓度约从  $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  缓慢增加至约  $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;23 点到次日 5 点, $PM_{2.5}$  质量浓度几乎不变;2)夏季  $PM_{2.5}$  质量浓度比春季约升高  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,随时间的变化特性与春季近似一样;3)秋季  $PM_{2.5}$  质量浓度略高于夏季;4)冬季  $PM_{2.5}$  质量浓度最大,从 18 点到 22 点, $PM_{2.5}$  质量浓度约从  $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  增加到  $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;22 点到次日 5 点, $PM_{2.5}$  质量浓度缓慢回落,至 5 时约为  $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $PM_{2.5}$  质量浓度年平均平均值随时间变化特性与秋季近似相同,约在 22 点  $PM_{2.5}$  质量浓度达到峰值。这一结论与文献[22-23]给出的天津市和长沙市 24 小时内颗粒物质量浓度年平均平均值保持一致。

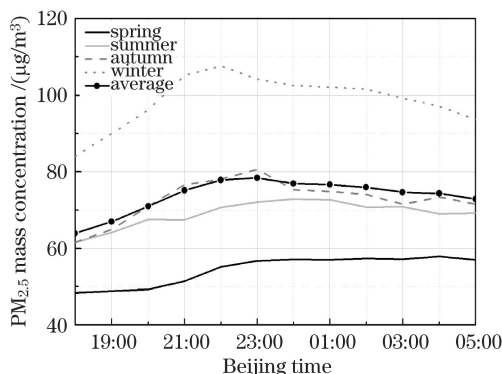


图 2 夜晚  $PM_{2.5}$  质量浓度的平均值

Fig. 2 Average  $PM_{2.5}$  mass concentration at night

### 3.2 地面上消光系数与 $PM_{2.5}$ 质量浓度的关系

2014 年 10 月 8 日晚上到 9 日早晨的天气是晴朗的,气温在  $22\sim 14\text{ }^\circ\text{C}$  之间,东风,风力小于 3 级。图 3 给出了当晚测量的结果,图 3(a)是侧向散射激光雷达反演出的地面上气溶胶消光系数随时间的变化情况,可以看出气溶胶消光系数是随时间的变化而增加的,约从 8 日晚上 19 点的  $0.4 \text{ km}^{-1}$  增加到 9 日早晨 5 点的  $1.1 \text{ km}^{-1}$ ;图 3(b)是地面上  $PM_{2.5}$  质量浓度随时间的变化情况,从 8 日晚上 19 点的  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  增加到 23 点时的  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,在 9 日凌晨 2 点以后又逐步减小,凌晨 5 点时约为  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  左右;比较图 3(a)和 3(b)可知,它们随时间变化的趋势是不完全相同的,这就导致这两者的比值(即比例系数  $K$ )是随时间变化的,结果如图 3(c)所示。在 8 日晚上 19 点至 24 点之间,比例系数  $K$  可看成是常数,在凌晨 0 点至 3 点之间缓慢增加,在 3 点至 5 点之间增长较快,图 3(d)给出了可能的解释:图 3(c)中,比例系数  $K$  在 8 日晚上至 9 日凌晨之前可近似看作常数,对应到图 3(d)中这一时间段内的水汽的相对湿度(RH)都近似小于 70%,这说明在水汽相对湿度小于 70%时,气溶胶的消光系数吸湿增长效应不明显;在凌晨 0 点至 3 点之间,比例系数  $K$  缓慢增加,对应的水汽相对湿度是在 70%到 80%之间,这说明这时的气溶胶的消光系数随相对湿度的增加而缓慢增大;在凌晨 3 点至 5 点之间,比例系数  $K$  急剧增加,对应的水汽相对湿度是在 80%以上,这说明此时气溶胶消光系数随相对湿度非线性增大。以上对比例系数  $K$  的解释是基于在一个晚上的测量时间内,假设气溶胶的尺度谱和折射率不变化的基础之上的,这种情况下比例系数仅受水汽相对湿度的影响。

2015 年 2 月 13 日晚上到 14 日早晨,大气污染严重,能见度较低,但天空是无云的,气温在  $14\sim 8\text{ }^\circ\text{C}$  之间,西北风,风力小于 3 级。图 4 给出了当晚测量的结果,图 4(a)是侧向散射激光雷达反演出的地面上气溶胶消光系数随时间的变化情况,气溶胶消光系数在 18 点至 23 点之间是随时间而增加的,约从  $1.0 \text{ km}^{-1}$  增加到  $1.3 \text{ km}^{-1}$ ,然后随时间缓慢减少,到 14 日早晨 6 点降至  $1.0 \text{ km}^{-1}$  左右;图 4(b)是地面上  $PM_{2.5}$  质量浓度随时间的变化情况,从 13 日晚上 18 点的  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  增加到 22 点的  $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,然后随时间缓慢减少,到 14 日早晨 6 点又降至  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  左右;比较图 4(a)和(b)可知,它们随时间变化的趋势是不完全相同的,这就导致比例系数  $K$  也是随时间变化的,结果如图 4(c)所示。在 13 日晚上 18 点至 24 点之间,比例系数  $K$  可看成是常数,在凌晨 0 点至 6 点之间缓慢增加;图 4(d)给出了比例系数  $K$  随时间的变化的解释:在图 4(d)中,从 13 日晚上 18 点至 24 点之间,水汽的相对湿度都小于 70%,比例系数  $K$  不随时间而变化的原因是这个相对湿度下气溶胶的消光系数吸湿增长效应不明显;在 0 点至 3 点之间,比例系数  $K$  缓慢增加是因为气溶胶的消光系数在相对湿度达到 70%时有吸湿增长的效应;在凌晨 0 点至 6 点之间,水汽的

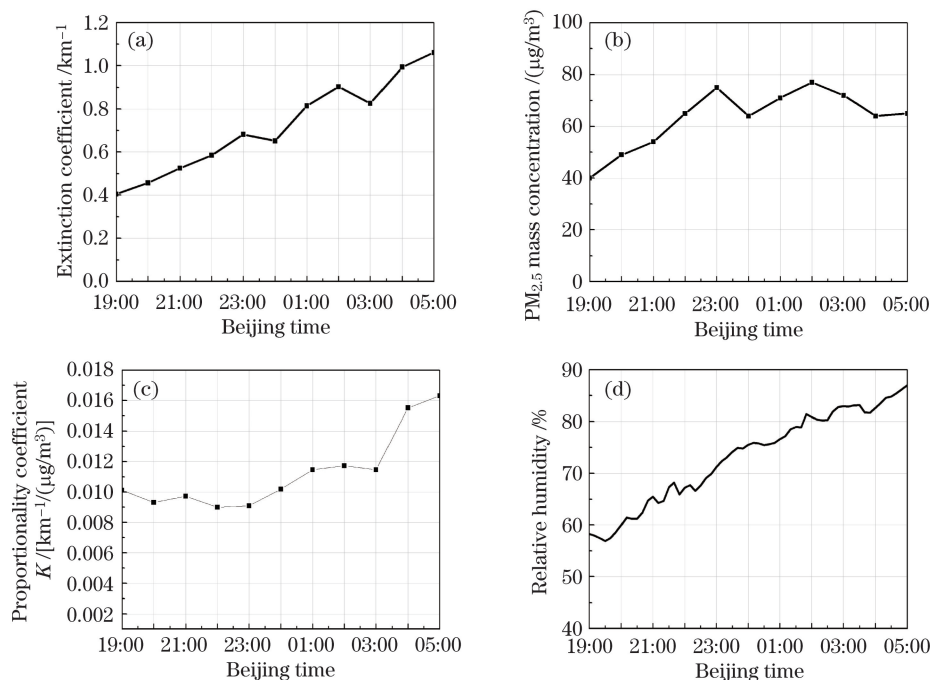


图 3 2014 年 10 月 8 日—9 日地面上各参数随时间变化的测量结果。(a)气溶胶消光系数；(b)PM<sub>2.5</sub> 质量浓度；(c)比例系数 K；(d)水汽相对湿度

Fig. 3 Measured results of various parameters versus time at ground on Oct. 8<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup>, 2014. (a) Aerosol extinction coefficient; (b) PM<sub>2.5</sub> mass concentration; (c) proportionality coefficient K; (d) RH parameters

相对湿度一直维持在 70% 左右,当气溶胶吸湿效应完成后(凌晨 3 点),比例系数 K 就在新的常数上维持不变。

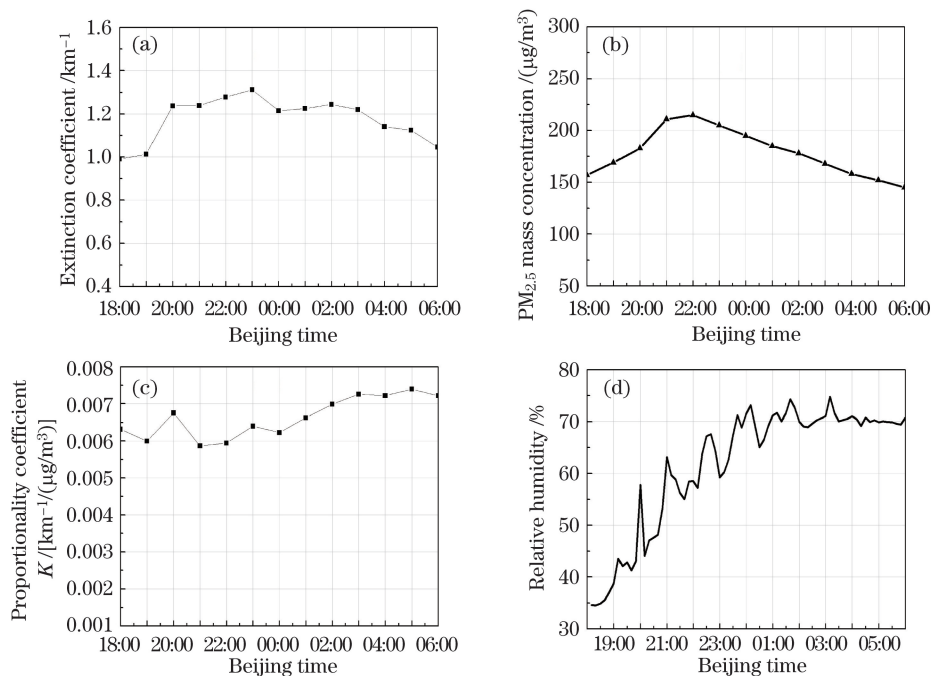


图 4 2015 年 2 月 13 日—14 日地面上各参数随时间变化的测量结果。(a)气溶胶消光系数；(b)PM<sub>2.5</sub> 质量浓度；(c)比例系数 K；(d)水汽相对湿度

Fig. 4 Measured results of various parameters versus time at ground on Feb. 13<sup>th</sup> to 14<sup>th</sup>, 2015. (a) Aerosol extinction coefficient; (b) PM<sub>2.5</sub> mass concentration; (c) proportionality coefficient K; (d) RH parameters

### 3.3 PM<sub>2.5</sub>质量浓度廓线个例及统计分布

通过 PM<sub>2.5</sub>质量浓度廓线可以获得其随高度分布的细节。图 5(a)和(b)分别是由 2014 年 10 月 8 日晚上 21 点和 2015 年 2 月 13 日晚上 21 点探测到的数据反演出的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度廓线。从图 5(a)中可知:地面上 PM<sub>2.5</sub>质量浓度在 55 μg/m<sup>3</sup>左右;在约 0.2 km 高度以内,PM<sub>2.5</sub>质量浓度迅速下降至 20 μg/m<sup>3</sup>左右;之后随着高度增加至 1.2 km 时,PM<sub>2.5</sub>质量浓度又缓慢增加至 30 μg/m<sup>3</sup>;在 1.3 km 高度之上,PM<sub>2.5</sub>质量浓度近似为零。图 5(b)是大气污染严重时的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度廓线个例:地面上 PM<sub>2.5</sub>质量浓度高达 210 μg/m<sup>3</sup>;在约 0.8 km 之内,PM<sub>2.5</sub>质量浓度下降至 20 μg/m<sup>3</sup>;之后在 1.3 km 左右,PM<sub>2.5</sub>质量浓度又呈现一个 115 μg/m<sup>3</sup>小峰值;在 3.0 km 高度附近,PM<sub>2.5</sub>质量浓度仍在 20 μg/m<sup>3</sup>左右。

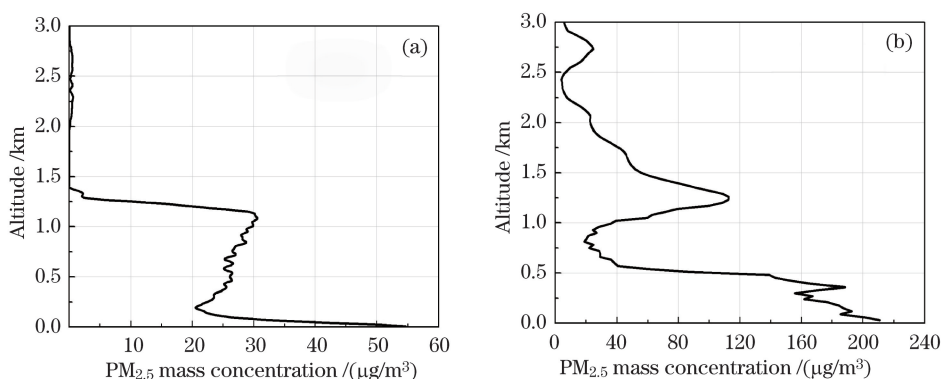


图 5 探测时间为(a)2014 年 10 月 8 日 21 时和(b)2015 年 2 月 13 日 21 时的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度高度廓线  
Fig. 5 Profiles of PM<sub>2.5</sub> mass concentration measured at (a) 21:00 on Oct. 8<sup>th</sup>, 2014 and (b) 21:00 on Feb. 13<sup>th</sup>, 2015

图 6 是两个晚上 PM<sub>2.5</sub>质量浓度高度廓线随时间的变化情况,从时间和高度两个维度上反映出 PM<sub>2.5</sub>质量浓度的时空变化细节。在图 6(a)中,PM<sub>2.5</sub>细颗粒物主要分布在 1.3 km 高度以内,且这一高度几乎不随时间而变;近地面浓度较大值(约 70 μg/m<sup>3</sup>)出现在 2014 年 10 月 8 日晚上 23 点和次日凌晨 2 点,与图 3(b)相呼应;高浓度的 PM<sub>2.5</sub>集中在近地面约 0.2 km 高度以内。图 6(b)中显示的细颗粒物时空分布与图 6(a)不同:1)PM<sub>2.5</sub>细颗粒物的主要分布高度随时间而降低,从 2015 年 2 月 13 日晚上 18 时的 2.3 km 降至次日凌晨 6 时的 1.5 km 左右;2)有一悬浮的细颗粒层,中心高度从 1.5 km 降至 1.0 km 左右,约在次日凌晨 4 点后消失;3)近地面的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度随时间的变化与图 4(b)一致。

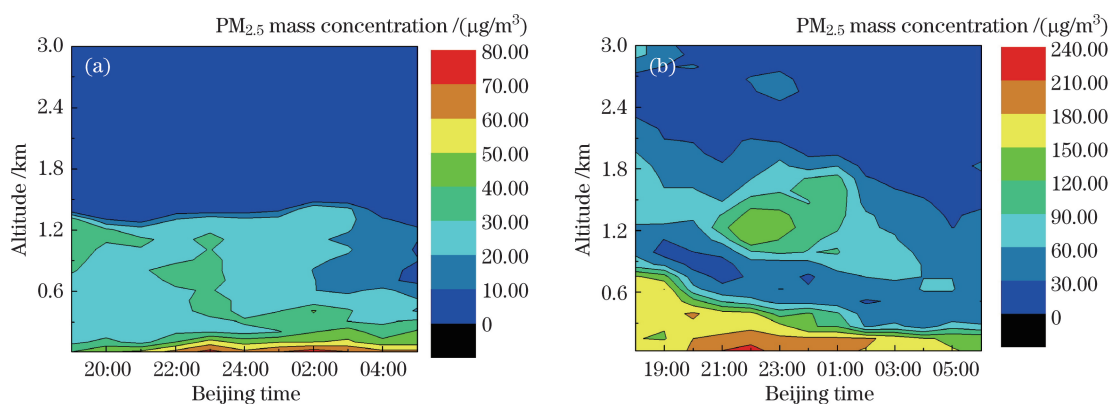


图 6 探测时间为(a)2014 年 10 月 8 日—9 日和(b)2015 年 2 月 13 日—14 日的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度高度廓线随时间的变化情况  
Fig. 6 Profiles of PM<sub>2.5</sub> mass concentration versus time measured on (a) Oct. 8<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup>, 2014 and (b) Feb. 13<sup>th</sup> to 14<sup>th</sup>, 2015

将 2014 年 3 月至 2015 年 2 月期间 82 个晚上的观测数据按(6)式反演出 PM<sub>2.5</sub>质量浓度廓线,然后对反演出的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度廓线按季节平均,得到了图 7 所示的春、夏、秋、冬及年平均结果。可以看出:1)关于地面上的浓度,春季 PM<sub>2.5</sub>质量浓度最低约为 40 μg/m<sup>3</sup>,夏季略高一点,约为 50 μg/m<sup>3</sup>,秋季达到 70 μg/m<sup>3</sup>,

冬季最高约为  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 春、秋季时与图 2 相近, 但在夏、冬季时与图 2 有区别, 主要原因是两者统计的天数不一致; 2) 在高度分布方面, 春季  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度主要分布在约 0.1 km 的高度内, 在高度上是不均匀的, 随高度升高而迅速降低, 由于春季大气污染情况较轻, 在 1.0 km 高度以上  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度小于  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 3) 夏、秋季  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度高度分布可分为两段, 大部分在近地面 0.1 km 的高度内, 在高度上也是不均匀的, 随高度升高而迅速降低, 但约在 1.2 km 高度仍有约  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 这主要是因为夏、秋季气温较高导致大气边界层顶上升, 污染物也随之上升; 4) 在四季中由于冬季取暖等原因, 污染最严重,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度主要分布在 0.5 km 的高度内, 并且在 1.2 km 处还出现一个小高峰, 在 3.0 km 高度左右仍有约  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 5)  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度年平均高度廓线介于秋、冬季之间, 随高度升高  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度逐渐降低。

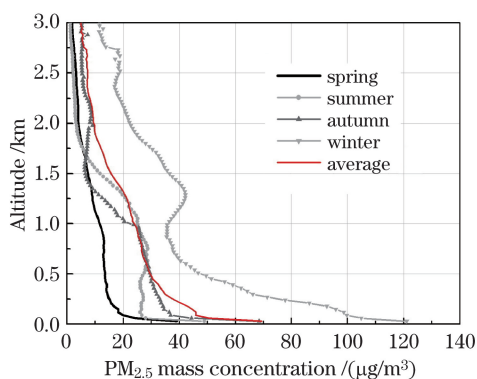


图 7  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度廓线季节平均

Fig. 7 Average profile of  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration by season

## 4 结 论

建立了一种集侧向散射激光雷达、后向散射激光雷达和  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度探测仪为一体探测  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度廓线的新系统。研究了地面  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与气溶胶消光系数的关系: 在相对湿度小于 70% 且气溶胶种类和成分不变的情况下, 气溶胶消光系数与  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度呈正比关系, 比例系数近似为一常数; 在相对湿度大于 70% 且气溶胶种类和成分不变的情况下, 气溶胶消光系数与  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度比例系数随相对湿度增加而增加。提出了一种基于上述新系统探测数据反演  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度廓线的方法, 利用该方法研究了  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度廓线的个例及其时空变化情况, 得到了 2014 年 3 月至 2015 年 2 月间  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度廓线季节平均结果: 四季中  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度主要分布在 0.5 km 以下的高度内, 且  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度随高度增加而迅速减小。这一结果可估算污染物的柱含量, 为大气污染综合治理决策和治理效果评估提供科学依据, 为深入研究城市颗粒物的输送和转化提供科学支持, 对大气污染质量预报及改善城市大气环境质量的措施有重要意义。

## 参 考 文 献

- 高 竹, 郭新彪. 大气  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  的健康效应比较[J]. 中国卫生工程学, 2006, 5(1): 52-55.
- Bai Zhipeng, Cai Binbin, Dong Haiyan, *et al.*. Adverse health effects caused by dust haze: a review[J]. Environmental Pollution & Control, 2006, 28(3): 198-201.  
白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(3): 198-201.
- Fu Minning, Zheng Youfei, Xu Xingsheng, *et al.*. Advance of study on monitoring and evaluation of  $\text{PM}_{2.5}$  [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(4): 1-6.  
傅敏宁, 郑有飞, 徐星生, 等.  $\text{PM}_{2.5}$  监测及评价研究进展[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(4): 1-6.
- Xu Jing, Ding Guoan, Yan Peng, *et al.*. Componential characteristics and sources identification of  $\text{PM}_{2.5}$  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  $\text{PM}_{2.5}$  的成分特征及来源分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 645-654.
- Wu Zhenling, Liu Aixia, Zhang Changchun, *et al.*. Vertical distribution feature of  $\text{PM}_{2.5}$  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  $\text{PM}_{2.5}$  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.



- 6 Yang Long, He Kebin, Zhang Qiang, *et al.*. Vertical distribution characters of PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 质量浓度垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 23-28.
- 7 Yang L, Sarnat J A, Vasu K, *et al.*. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> in the eastern United States using satellite remote sensing[J]. Environ Sci Technol, 2005, 39(9): 3269-3278.
- 8 Sano I, Mukai M, Okada Y, *et al.*. Improvement of PM<sub>2.5</sub> analysis by using AOT and lidar data[C]. SPIE, 2008, 7152: 71520M.
- 9 Chu D A. Analysis of the relationship between MODIS aerosol optical depth and PM<sub>2.5</sub> in the summer time US[C]. SPIE, 2006, 6299: 629903.
- 10 Donkelaar A V, Martin R V, Pasch A N, *et al.*. Improving the accuracy of daily satellite-derived ground-level fine aerosol concentration estimates for North America[J]. Environ Science Technology, 2012, 46(21): 11971-11978.
- 11 Li Qian, Li Chengcai, Wang Yefang, *et al.*. Retrieval on mass concentration of urban surface suspended particulate matter with LIDAR and satellite remote sensing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(4): 673-682.  
李 倩, 李成才, 王焯芳, 等. 利用激光雷达和卫星遥感获得城市地面大气悬浮颗粒物浓度分布[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(4): 673-682.
- 12 Weitkamp C. Lidar: Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere[M]. New York: Springer Science, 2005: 105-138.
- 13 Bernes J E, Parikh Sharma N C, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system[J]. Appl Opt, 2007, 46(15): 2922-2929.
- 14 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device 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 Shi Bo, Tao Zongming, Ma Xiaomin, *et al.*. Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501006.  
史 博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501006.
- 16 Tao Z, Liu D, Wang Z, *et al.*. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-couple device side-scatter lidar[J]. Opt Express, 2014, 22(1): 1127-1134.
- 17 Tao Z, Liu D, Ma X, *et al.*. Vertical distribution of near-ground aerosol backscattering coefficient measured by a CCD side-scattering lidar[J]. Appl Phys, 2015, 120(4): 631-635.
- 18 Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: Some comments[J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652-653.
- 19 Tao Z, Liu D, Xie C, *et al.*. A numerical inversion method for CCD side-scatter lidar[C]. Proceeding of International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2013, 31(6): 350-352.
- 20 Tao Zongming, Shan Huihui, Ma Xiaomin, *et al.*. Retrieval method of PM<sub>2.5</sub> mass concentration profile in near-ground and case study[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110102.  
陶宗明, 单会会, 麻晓敏, 等. 近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度廓线反演方法及个例研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110102.
- 21 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.
- 22 Song Ming, Han Suqin, Zhang Min, *et al.*. Relationship between visibility and relative humidity, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> in Tianjin [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(2): 34-41.  
宋 明, 韩素芹, 张 敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 34-41.
- 23 Wang Qi, Deng Qihong, Tang Meng, *et al.*. Mass concentration and variations of particulate matters PM<sub>10</sub> in suburban air of Changsha, China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(6): 2419-2423.  
王 琪, 邓启红, 唐 猛, 等. 长沙市郊区环境大气中颗粒物 PM<sub>10</sub> 的质量浓度及其变化特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2419-2423.