

# 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的 光学和吸湿性质

伯广宇 刘东\* 吴德成 王邦新 钟志庆 谢晨波 周军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031)

**摘要** 气溶胶的光学和吸湿性质信息对研究雾霾形成的机制至关重要。为了在环境相对湿度背景下研究利用激光雷达方法探测雾霾气溶胶光学和吸湿性质,选择合肥地区两次典型雾霾过程作为个例,利用水平探测的双波长激光雷达获取气溶胶消光系数、能见度、Angstrom 波长指数以及消光系数吸湿增长因子。个例研究结果表明,在环境相对湿度变化的背景下,激光雷达可以有效地获取雾霾气溶胶光学参数以及吸湿增长因子随相对湿度的变化规律,且具有探测开放大气和不扰动被测大气的技术优势。

**关键词** 遥感;激光雷达;雾霾;气溶胶;光学性质;吸湿增长因子

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0113001

## Two-Wavelength Lidar for Observation of Aerosol Optical and Hygroscopic Properties in Fog and Haze Days

Bo Guangyu Liu Dong Wu Decheng Wang Bangxin Zhong Zhiqing  
Xie Chenbo Zhou Jun

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

**Abstract** Informations about the optical and hygroscopic properties are important for understanding the haze formation mechanism. In order to detect the optical properties and hygroscopic behavior of atmospheric aerosol in fog and haze days under the background of environmental relative humidity change, two cases of typical fog and haze days in Hefei area are studied as examples, and aerosol extinction coefficient, visibility, the Angstrom wavelength index and extinction coefficient hygroscopic growth factor are obtained by using horizontal detection of dual-wavelength lidar. Case study results show that the lidar, with the advantage of detecting unperturbed and ambient atmospheric conditions, can effectively gain the change rule of fog aerosol optical parameters of the hygroscopic absorption and growth factor varying with relative humidity.

**Key words** remote sensing; lidar; fog and haze; aerosols; optical properties; hygroscopic growth factor

**OCIS codes** 010.3640; 280.3640; 010.1110; 280.1100

## 1 引言

随着我国工业化和城市化进程的加快,人为污染物的排放量增加,导致雾霾发生几率增大。特别是 2013 年年初我国中东部地区出现持续性、大范围

的雾霾天气,给日常生产和生活带来了严重的不利影响。故雾霾的形成机制和预报研究引起了人们空前的重视。目前已有利用气象资料、地面取样分析仪器、遥感技术以及数值模拟<sup>[1-8]</sup>等手段,研究雾霾

收稿日期: 2013-07-05; 收到修改稿日期: 2013-08-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41205019)、国家 973 计划(2013CB955802)

作者简介: 伯广宇(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事气溶胶光学特性方面的研究。

E-mail: boguangyu@sohu.com

\* 通信联系人。E-mail: dliu@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的分布、光学性质以及微物理和化学过程的报道。已有的研究表明,气溶胶的光学和吸湿性质信息对研究雾霾的形成机制至关重要<sup>[9]</sup>。雾霾过程中气溶胶光学性质的变化,将会对区域环境和能见度产生一定的影响。雾霾过程中气溶胶的吸湿性质,则是联系气溶胶微物理和化学性质的关键参数,更是气溶胶光学性质的决定性参数之一。因而为了研究雾霾产生的机制和危害程度,必须加强雾霾过程中气溶胶的光学和吸湿性质的观测和观测方法研究。

目前,取样观测粒子光学和吸湿性质常用的手段有测量散射系数的浊度计、测量吸收系数的黑碳仪以及测量粒径吸湿增长的颗粒物吸湿粒径分析仪(HTDMA)等,这些方法通常需要在分析室内对颗粒物进行干燥或加湿处理,干燥或者加湿的过程或多或少地扰动了被测粒子。激光雷达作为一种主动遥感技术,在环境相对湿度背景下,可以获得随环境相对湿度变化的气溶胶消光系数,并计算得到消光系数吸湿增长因子,并且在观测过程中被测大气始终处在开放状态<sup>[10]</sup>,因而激光雷达测量的气溶胶光学参数和吸湿性质更贴近实际大气状况。本文尝试利用激光雷达水平测量方法,研究近地面雾霾气溶胶的光学和吸湿性质,通过两次典型的雾霾天气作为研究个例,利用激光雷达水平测量的消光系数和波长指数,结合地面相对湿度,分析消光系数、波长指数和吸湿增长因子随相对湿度的变化。

## 2 观测仪器和数据处理方法

### 2.1 观测地点和仪器

观测地点位于合肥市区西郊,合肥地处江淮之间,一般认为合肥地区的气溶胶类型属于污染型陆地气溶胶。合肥市区人口500万,汽车保有量逐年快速上升,近年来雾霾事件频发。观测使用了一台自研的532~1064 nm双波长米氏散射激光雷达<sup>[11]</sup>,利用其水平探测能力,获取近地面气溶胶消光系数、Angstrom波长指数以及大气能见度等光学参数,结合相对湿度数据,还可以计算消光系数吸湿增长因子。激光雷达的基本配置如下:激光器重复频率为20 Hz,532 nm和1064 nm波长激光发射能量均为100 mJ,接收望远镜口径为200 mm,数据采集单元的距离分辨率为7.5 m。同步获取的相对湿度和温度数据来自位于同一观测点的35 m铁塔上的气象温湿度传感器,风速数据来自铁塔上的超声风速仪。

### 2.2 数据处理方法

激光雷达水平探测时采用斜率法计算大气的水

平消光系数,即认为大气在水平方向上是均匀的,因此水平方向上的米氏散射激光雷达方程可表示为<sup>[12-13]</sup>

$$P(z) = Cz^{-2}\beta\exp(-2\alpha_H z), \quad (1)$$

式中 $P(z)$ 是激光雷达接收的大气后向散射光的回波功率(单位为W); $C$ 是激光雷达系统常数(单位为 $W \cdot km^3 \cdot sr$ ); $\beta$ 是大气水平后向散射系数(单位为 $km^{-1} \cdot sr$ ); $\alpha_H$ 是大气水平消光系数(单位为 $km^{-1}$ )。对(1)式两边取对数并对距离 $z$ 求导可得

$$d\{\ln[P(z)z^2]\}/dz = (1/\beta)d\beta/dz - 2\alpha_H. \quad (2)$$

由于大气水平均匀,故 $d\beta/dz=0$ 。因此,对(2)式中 $\ln[P(z)z^2]$ 和 $z$ 进行最小二乘法线性拟合,拟合直线斜率的一半则是这段大气水平消光系数 $\alpha_H$ ,其中包含来自气溶胶粒子和空气分子的共同贡献,由于在雾霾天气下,地面532 nm波长的分子消光系数比气溶胶小一个量级以上,故计算过程中忽略分子的消光系数。从激光雷达获得的1064 nm和532 nm气溶胶的消光系数,计算得到气溶胶Angstrom波长指数(简称波长指数)为

$$\delta = \ln(\alpha_{532}/\alpha_{1064})/\ln(1064/532), \quad (3)$$

在满足Junge分布的假设条件下,波长指数 $\delta$ 可以用来描述气溶胶的尺度谱特征, $\delta$ 与粒子粒径的大小呈负相关。水平能见度 $R_V$ 与550 nm波长的大气水平消光系数 $\alpha_H$ 之间的关系如下:

$$R_V = 3.912/\alpha_H. \quad (4)$$

由于532 nm与550 nm两个波长相靠很近,因而可以用激光雷达测量532 nm波长的大气水平消光系数 $\alpha_H$ ,由(4)式计算得到大气水平能见度。

## 3 数据及分析

### 3.1 2012年1月观测个例

根据气象部门的预报,2012年1月中旬我国中东部出现了多日持续的雾霾天气,图1给出了2012.01.11 T 12:00—2012.01.13 T 04:00激光雷达的观测数据,数据的时间分辨率为15 min一组。图1(a)中方形、圆形和五角星分别为532 nm和1064 nm消光系数以及波长指数;图1(b)中方形和五角星分别为水平能见度和相对湿度;图1(c)中方形和五角星分别为温度和平均风速。观测期间平均风速为 $(1.07 \pm 0.52)$  m/s,微风极不利于本地污染的扩散,易于雾霾天气的发生。地面气温在 $0.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,相对湿度在32%~75%之间,能见度在2.5~7 km之间。参照吴兑等<sup>[1]</sup>对雾霾的定义,观测期间属于典型的灰霾过程。

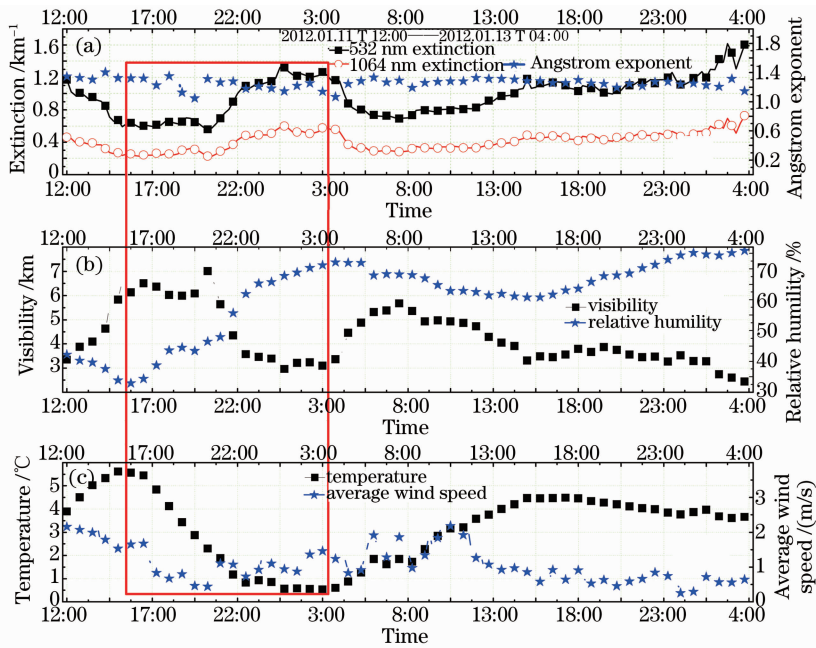


图1 2012年1月个例观测结果。(a) 气溶胶光学参数；(b) 地面相对湿度和能见度；(c) 地面温度和风速  
Fig. 1 Observation results of January, 2012 case study. (a) Aerosol optical properties; (b) relative humidity and visibility on the ground; (c) temperature and wind speed on the ground

从图1消光系数和相对湿度的变化趋势中可以看出,消光系数和相对湿度呈明显的正相关性(粒子的吸湿增长导致其消光效率增强),显示粒子有较强的吸湿增长能力,说明粒子中亲水性成分占主导地位。分析图1方框内所示的相对湿度增长过程(2012.01.11 T 16:00—2012.01.12 T 03:45),该过程中地面温度从 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降至 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度则从 $32\%$ 增加至 $72\%$ , $532\text{ nm}$ 波长的消光系数则从 $0.61\text{ km}^{-1}$ 增加至 $1.16\text{ km}^{-1}$ ,增加了 $0.9$ 倍,而 $1064\text{ nm}$ 波长消光系数则从 $0.24\text{ km}^{-1}$ 增加至 $0.56\text{ km}^{-1}$ ,增加了 $1.3$ 倍。

### 3.2 2013年1月观测个例

2013年1月中旬,我国中东部地区出现了大范围的严重雾霾天气,合肥同样也出现了持续的雾霾。图2(a)给出了2013.01.16 T 08:40—2013.01.17 T 22:00激光雷达的观测结果,本次实验进行了加密观测,数据的时间分辨率为 $5\text{ min}$ 一组,各曲线的定义与图1相同。选择这段观测数据期间出现了霾-雾-霾的连续转化过程,便于分析转化过程中气溶胶光学和吸湿性质的变化。观测期间地面温度在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,相对湿度在 $62\%\sim 93\%$ 之间,能见度在 $1.2\sim 5\text{ km}$ 之间,地面平均风速为 $(1.04\pm$

$0.51)\text{ m/s}$ ,气象条件易于雾霾天气的发生。

分析图2红色框内所示的相对湿度增长过程(2013.01.16 T 20:30—2013.01.17 T 04:30),该过程中地面温度从 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度则从 $72\%$ 增加至 $93\%$ ,能见度下降到 $1.2\text{ km}$ ,此时形成了雾,红色框内的观测数据属于典型的霾-雾转化过程。在这个过程中 $532\text{ nm}$ 波长消光系数从 $1.2\text{ km}^{-1}$ 增加到 $3.2\text{ km}^{-1}$ ,增加了 $1.7$ 倍; $1064\text{ nm}$ 波长消光系数从 $0.8\text{ km}^{-1}$ 增加到 $2.0\text{ km}^{-1}$ ,增加了 $1.5$ 倍。在霾至雾的转化过程中,波长指数从 $0.9$ 下降至 $0.6$ ,波长指数的减小显示粒子粒径呈明显的增大趋势。在箭头所指的时间段(2013.01.17 T 08:00前后),随着相对湿度快速下降至 $73\%$ ,消光系数同样呈现下降趋势,能见度则快速上升至 $5\text{ km}$ ,观测数据显示雾又转化为霾,在雾至霾的转化过程中,波长指数的增大趋势显示粒子的粒径趋于减小。图2给出的观测数据说明,大气中的气溶胶粒子随相对湿度的增大或减小,不断地发生着潮解或风化过程,在潮解、风化过程中,单个粒子的粒径和折射指数等微物理参数随之变化,致使气溶胶粒子群宏观上的光学性质也在发生变化<sup>[14]</sup>。

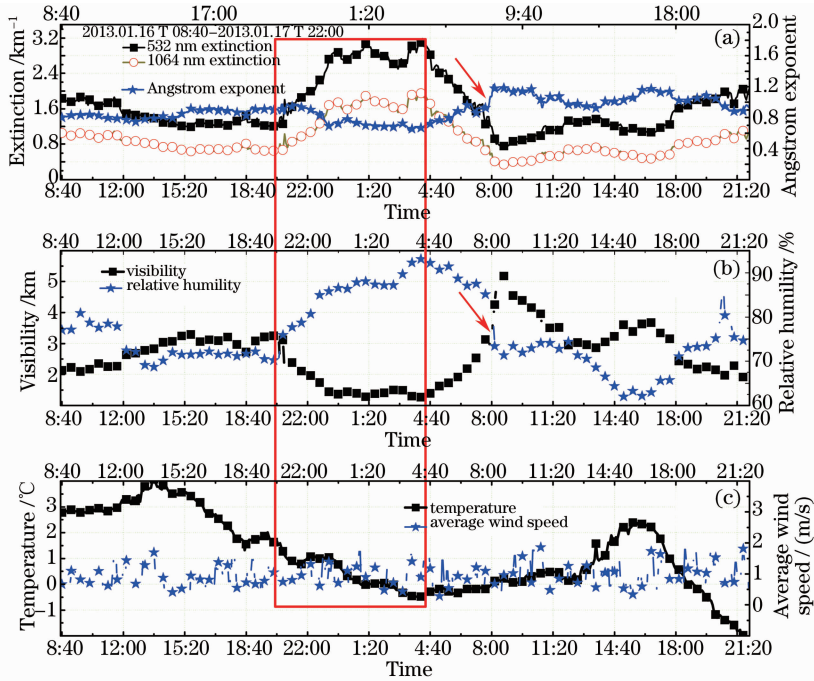


图 2 2013 年 1 月个例观测结果。(a) 气溶胶光学参数；(b) 地面相对湿度和能见度；(c) 地面温度和风速  
Fig. 2 Observation results of January, 2013 case study. (a) Aerosol optical properties; (b) relative humidity and visibility on the ground; (c) temperature and wind speed on the ground

### 3.3 气溶胶光学和吸湿增长性质分析

根据图 1 和图 2 方框所示的两个相对湿度增长的过程(32%~72%、72%~93%),可以分析观测期间雾霾气溶胶的吸湿性增长性质,选择这两个过程的原因是相对湿度有衔接点,便于对比分析。粒子的吸湿增长常用吸湿增长因子  $f$  描述,按照定义有粒径、消光系数和折射率吸湿增长因子,这里采用消光系数增长因子  $f_{RH}$  描述气溶胶的吸湿性增长性质,它的定义是相对湿度  $H_{RH}$  的消光系数  $\alpha(H_{RH})$  与参考相对湿度  $H_{RRH}$  的消光系数  $\alpha(H_{RRH})$  之间的比值,即

$$f_{RH} = \alpha(H_{RH}) / \alpha(H_{RRH}). \quad (5)$$

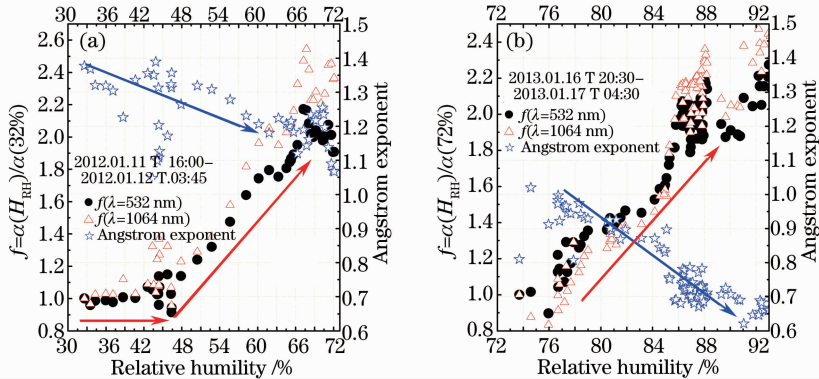


图 3 吸湿增长因子和波长指数随相对湿度的变化对比。(a) 2012.01; (b) 2013.01  
Fig. 3 Comparison of the hygroscopic growth factors and Angstrom exponents with relative humidity.  
(a) 2012.01; (b) 2013.01

根据(5)式,两个相对湿度增长过程中吸湿增长因子  $f_{RH}$  分别为:  $\alpha(H_{RH}) / \alpha(32\%)$  和  $\alpha(H_{RH}) / \alpha(72\%)$ 。吸湿增长因子随相对湿度变化的计算结果如图 3 所示,图中圆点为 532 nm 波长的消光系数增长因子,三角形为 1064 nm 波长的消光系数增长因子,五角星为波长指数随相对湿度的变化。一般认为相对湿度为 30% 左右时是干粒子,图 3(a) 中当相对湿度从 32% 增加至 45% 时,消光系数吸湿增长因子基本不变且约等于 1,显示从干粒子开始的吸湿增长需要一个起始相对湿度,这个现象也符合一些观测研究和模式计算的结果<sup>[15]</sup>。当相对湿度增加至 72% 时,532 nm 波长吸湿增长因子

增加至 1.9,在被分析的相对湿度区间上,该值与文献[16]报道的城市型或人为污染型气溶胶的吸湿增长因子观测结果类似。从图 3(a)还可以发现,在对应的相对湿度上,用 1064 nm 波长计算的吸湿增长因子略大于用 532 nm 波长计算的吸湿增长因子。图 3(a)还显示,波长指数随着相对湿度的增加从 1.4 减小到 1.1 以下,波长指数的减小趋势同粒子的吸湿增长是对应的,显示气溶胶粒子吸湿增长最终导致其粒径呈增大的趋势。

从图 3(b)中可以看出,当相对湿度从 72% 增加至 93% 时,利用 532 nm 波长计算的吸湿增长因子从 1 增加至约 2.3,呈现出明显的增加趋势。而波长指数从 1 减小至 0.6 左右,呈现出明显的减小趋势,当相对湿度为 93% 时,这时已经形成了粒径很大的雾粒子。利用 1064 nm 波长计算的吸湿增长因子,其变化趋势与 532 nm 波长基本一致,但在 93% 的相对湿度上吸湿增长因子达到 2.5,高于利用 532 nm 波长计算的结果。

图 3 中所示的波长指数的大小和变化趋势在 72% 的相对湿度点上可以很好地衔接起来,显示的两次个例观测时间虽然是相隔一年开展的,但是粒子由于吸湿增长而引起的粒径变化应当有可比性。鉴于影响气溶胶吸湿性的主要因素是粒子中亲水性和憎水性组分的混合状态,考虑到观测期间风速很小、本地污染物不易扩散,两次个例观测到的应当都是本地的污染型气溶胶,其组分应当类似,因而其吸湿增长性质具备可比性。

使用归一化的增长因子描述气溶胶的吸湿增长

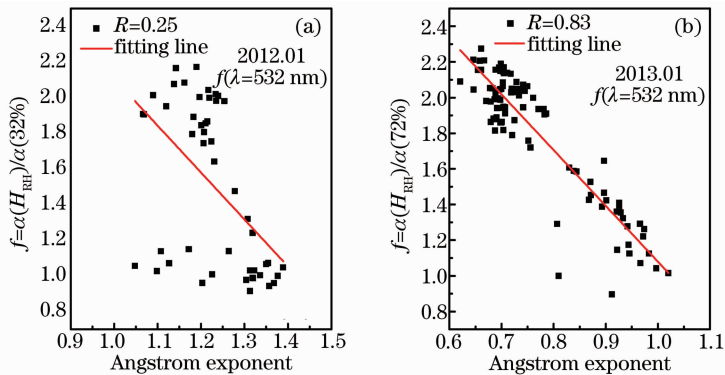


图 4 波长指数同吸湿增长因子的关系对比。(a) 2012.01; (b) 2013.01

Fig. 4 Comparison of the hygroscopic growth factors with Angstrom exponent. (a) 2012.01; (b) 2013.01

### 3.5 下一步工作

在此基础上,下一步将利用实验室新近开发成功的 355 nm-532 nm-1064 nm 三波长米氏散射-水汽拉曼激光雷达同时反演获取气溶胶粒子的光学参

效率  $f'$  (定义为增长因子  $f$  除以相对湿度的变化量  $\Delta H_{RH}$ ),图 3(a)中当相对湿度从 32% 增加到 72% 时,利用 532 nm 和 1064 nm 两个波长计算得到的归一化吸湿性增长因子分别为:  $f'_1(\lambda=532 \text{ nm})=4.8$  和  $f'_1(\lambda=1064 \text{ nm})=5.99$ 。图 3(b)中当相对湿度从 73% 增加到 93% 时,利用 532 nm 和 1064 nm 两个波长计算得到的归一化吸湿性增长因子分别为:  $f'_2(\lambda=532 \text{ nm})=10.98$ ,  $f'_2(\lambda=1064 \text{ nm})=11.69$ 。在两个波长上,均显示  $f'_2$  约是  $f'_1$  归一化增长因子的两倍,说明粒子吸湿增长速度不是线性的,相对湿度越大粒子吸湿性增长越快。用 1064 nm 波长计算得到的归一化吸湿增长因子略高于用 532 nm 波长的计算结果,其原因应当是根据米氏散射理论的尺度参数,随着气溶胶粒径的吸湿增长,波长较长的 1064 nm 光对大粒子更敏感,粒子对 1064 nm 波长的消光效率增加速度要快于 532 nm 波长。

### 3.4 波长指数同吸湿增长因子之间的关系

图 4 给出了两个相对湿度增长过程中,532 nm 吸湿增长因子与波长指数之间的关系。结果显示当相对湿度从 32% 增加至 72% 的过程中,吸湿增长因子与波长指数呈负相关性,相关系数  $R$  为 0.25,相关性较弱。而当相对湿度从 72% 增加至 93% 的过程中,吸湿增长因子与波长指数的相关系数  $R$  为 0.83,相关性较高。上述结果同样说明,相对湿度越大粒子粒径的增长速度越快,与粒径大小密切相关的波长指数增大的速度越快,导致吸湿增长因子与波长指数的相关性越大。1064 nm 波长吸湿增长因子与波长指数的相关性也有相同的现象,不再一并给出。

数、尺度谱以及相对湿度<sup>[17]</sup>,不仅获取近地面雾霾的光学和吸湿特性,还可以获取雾霾光学和吸湿性质的垂直分布特征,从而使激光雷达方法可以更加有效地探测和分析雾霾的产生及其转化机制。

## 4 结 论

两次个例观测结果表明: 1) 无风或微风的气象条件使得地面细颗粒物积聚, 对雾霾的形成阶段起到重要作用; 2) 粒子因吸湿增长引起气溶胶粒子消光效率的进一步增强, 加剧了能见度的降低, 对雾霾的持续和恶化起到重要作用。利用水平探测的激光雷达结合地面相对湿度的观测研究方法, 可以有效地获取雾霾气溶胶的消光系数、波长指数、能见度和吸湿增长因子随相对湿度的变化规律。该方法可以成为地面取样观测仪器的有效补充, 从而丰富对雾霾光学和吸湿性质的观测手段。

**致谢:** 感谢中国科学院大气成分与光学重点实验室吴晓庆研究员和崔朝龙博士提供地面气象参数数据

## 参 考 文 献

- 1 Wu Dui, Wu Cheng, Chen Huanhuan, *et al.*. An analysis of severe haze process in november 2009 over the pearl river delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(5): 120-127.  
吴 兑, 吴 晟, 陈欢欢, 等. 珠三角 2009 年 11 月严重灰霾天气过程分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(5): 120-127.
- 2 Zhang Hao, Shi Chun'e, Qiu Mingyan, *et al.*. Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4): 714-721.  
张 浩, 石春娥, 邱明燕, 等. 合肥市霾天气变化特征及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(4): 714-721.
- 3 Wang Liping, Chen Shaoyong, Dong Anxiang. The distribution and seasonal variations of fog in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 689-697.  
王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 中国雾区的分布及其季节变化[J]. *地理学报*, 2005, 60(4): 689-697.
- 4 Gao Ge. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961-2005[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 761-768.  
高 歌. 1961-2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. *地理学报*, 2008, 63(7): 761-768.
- 5 Min Min, Wang Pucai, Zong Xuemei, *et al.*. Observation and study on aerosol properties in hazy days [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(2): 153-160.  
闵 敏, 王普才, 宗雪梅, 等. 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(2): 153-160.
- 6 Yan Baodong, Song Xiaoquan, Chen Chao, *et al.*. Beijing atmospheric boundary layer observation with lidar in 2011 spring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s128001.  
闫宝东, 宋小全, 陈 超, 等. 2011 春季北京大气边界层的激光雷达观测研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s128001.
- 7 Pan Hu, Geng Fuhai, Chen Yonghang, *et al.*. Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2164-2173.  
潘 鹤, 耿福海, 陈勇航, 等. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2164-2173.
- 8 J H Tan, J C Duan, D H Chen, *et al.*. Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94(2): 238-245.
- 9 Xingnan Ye, Zhen Ma, Dawei Hu, *et al.*. Size-resolved hygroscopicity of submicrometer urban aerosols in Shanghai during wintertime [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99(2): 353-364.
- 10 M Pahlow, G Feingold, A Jefferson, *et al.*. Comparison between lidar and nephelometer measurements of aerosol hygroscopicity at the southern great plains atmospheric radiation measurement site [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D5): D05S15.
- 11 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1014002.  
伯广宇, 刘 东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达 [J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1014002.
- 12 Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing, *et al.*. Slant measurements of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1015-1019.  
张改霞, 张寅超, 胡顺星, 等. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程探测 [J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1015-1019.
- 13 Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong, *et al.*. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1214001.  
陶宗明, 吴德成, 刘 东, 等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算 [J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1214001.
- 14 I N Tang. Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(14): 19245-19250.
- 15 Luyen Chen, Futien Jeng, Chihchieh Chen, *et al.*. Hygroscopic behavior of atmospheric aerosol in Taipei [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(15): 2069-2075.
- 16 Liu Xingang, Zhang Yuanhang. Advances in research on aerosol hygroscopic properties at home and abroad [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(6): 808-816.  
刘新罡, 张远航. 大气气溶胶吸湿性质国内外研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(6): 808-816.
- 17 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.*. Development of three wavelength Raman polarization lidar system and case study [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001.  
刘 东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例 [J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228001.

栏目编辑: 王晓球