

# 激光雷达遥感地表气溶胶消光吸湿因子及其对波长的依赖特性

伯广宇<sup>1</sup> 李爱悦<sup>2</sup> 徐赤东<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院合肥技术创新工程院, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心, 安徽 合肥 230031

**摘要** 介绍了一种在开放大气环境下、利用水平探测的双波长-偏振米氏散射激光雷达遥感地表气溶胶消光吸湿增长因子的新方法。在激光雷达垂直观测气溶胶吸湿性质相关研究报道的数据筛选方法的基础上,利用消光系数与实测相对湿度(RH)之间的强相关性,以及实测的粒子质量浓度和粒子退偏振比的变化规律作为判据,说明吸湿增长作用是引起地表气溶胶消光系数增大的主要原因。相比于激光雷达垂直方法观测气溶胶吸湿性质,该筛选过程更加严格地约束了激光雷达水平观测吸湿性质的筛选判据,且对气象条件的约束相对简单。利用筛选得到的有效数据,计算得到气溶胶消光吸湿增长因子,并分析其对波长的依赖特性。观测结果表明,在开放大气条件下,合肥地区粒子谱分布可能会出现单模态、双模态甚至多模态的复杂情况,导致 Angstrom 波长指数与相对湿度之间的变化规律表现为正相关、负相关和不相关 3 种结果;同样也导致短波的气溶胶消光吸湿增长因子弱于、等于或强于长波的气溶胶消光吸湿增长因子的多样性现象。

**关键词** 大气光学; 气溶胶; 激光雷达; 消光系数; Angstrom 波长指数; 吸湿增长因子; 波长依赖特性

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0601003

## Remote Sensing Aerosol Extinction Hygroscopic Growth Factor and Its Wavelength Dependence Using Lidar

Bo Guangyu<sup>1</sup> Li Aiyue<sup>2</sup> Xu Chidong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Technology Innovation, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

<sup>2</sup>*Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

**Abstract** A new method of using two-wavelength Mie-depolarization lidar for remote sensing extinction hygroscopic growth factor of aerosol near ground layer under varying conditions of relative humidity(RH) is proposed. Based on the algorithm used in lidar vertical aerosol hygroscopic growth observations, lidar horizontal measurements data is researched using strong correlation between extinction coefficient and RH, and the measured particle mass concentration going along with the decrease of depolarization ratio is used as a criterion, which proves that the hygroscopic effect of aerosol is the main cause of the extinction coefficient increment. Compared to the lidar vertical aerosol hygroscopic growth observations method, the proposed method has the advantage of the raising data selection criterion and simple meteorological conditions. Extinction hygroscopic growth factor can be calculated using valid data in lidar database, and its wavelength dependence is analyzed. Observation results at Hefei district show that, in various natural atmospheric environments, unimodal, bimodal and even multimodal aerosol distributions may exist. As a result, positive correlation, negative correlation and irrelevance between RH and Angstrom exponent can be observed, and hygroscopic growth factor at short wavelength can be weaker than,

**收稿日期:** 2016-01-06; **收到修改稿日期:** 2016-02-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(41205019, 41405032)、2014 年度中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(KLAS201403)

**作者简介:** 伯广宇(1980—),男,博士,副研究员,主要从事大气光学遥感方面的研究。E-mail: boguangyu@sohu.com

\* **通信联系人.** E-mail: xcd@aiofm.ac.cn

stronger than or equal with that at long wavelength.

**Key words** atmospheric optics; aerosol; lidar; extinction coefficient; Angstrom exponent; hygroscopic growth factor; wavelength dependence

**OCIS codes** 010.0010; 010.3640; 010.1110

## 1 引 言

气溶胶的吸湿性质是指气溶胶在周围环境相对湿度(RH,  $X_{RH}$ )增加时的吸水能力<sup>[1]</sup>。粒子的吸湿作用将导致粒径的增长、粒径谱分布的偏移,以及气溶胶复折射率的变化,从而导致气溶胶光学性质的变化,进而影响大气光学厚度、大气中气-粒转化过程以及气溶胶形成云凝结核的过程,最终影响大气辐射强迫研究的不确定性<sup>[2-3]</sup>。故吸湿性质是联系气溶胶微物理和化学性质的关键参数。气溶胶消光系数是大气辐射强迫研究领域中最受关注的参数,因此开展消光吸湿增长因子的观测研究,远比研究粒径或者散射吸湿增长因子有实用价值<sup>[4-5]</sup>。由于缺乏消光吸湿性质实测数据,目前辐射模式多使用经验吸湿参数<sup>[6]</sup>,因此无法满足精确计算的要求。地表气溶胶消光吸湿增长因子<sup>[7-9]</sup>的准确获知是卫星遥感地表颗粒物浓度的算法中需要解决的关键问题之一。但卫星遥感地表气溶胶质量浓度的算法多使用消光吸湿增长因子的经验值,导致计算过程中引入了较大的误差源<sup>[10]</sup>。

关于气溶胶吸湿性质的外场观测研究,虽然已经经历了数十年的发展<sup>[11-12]</sup>,但全球范围内的观测研究还非常少<sup>[13]</sup>,国内有限的观测集中在北京、广州等大城市周边地区<sup>[9]</sup>。已有的研究报道绝大多数针对散射或者粒径吸湿增长因子<sup>[6,14-23]</sup>,仅有个别针对消光吸湿增长因子<sup>[24-26]</sup>。这些研究所关注的科学问题集中在分析气溶胶类型对单波长吸湿增长性质的影响<sup>[27-29]</sup>;仅有个别研究报道了多波长散射吸湿增长因子及其波长依赖特性<sup>[2]</sup>。目前针对消光吸湿增长因子波长依赖特性的研究未见报道。因到达地表的太阳辐射强度具有强烈的波长依赖性,所以,在大气辐射强迫和卫星遥感气溶胶算法研究中,开展多波长消光吸湿增长因子及其波长依赖关系的观测研究,对于提高大气辐射强迫和卫星遥感气溶胶质量浓度的计算精度,均具有重要的实用价值。

在开放大气环境下,激光雷达是测量气溶胶吸湿性质的最直接的手段。相比较于吸湿浊度计、粒径吸湿增长测量设备等取样观测技术,激光雷达有其独到的技术优势:1)测量开放大气气溶胶,且不扰动被测气溶胶及其周围的大气<sup>[18,25]</sup>;2)开放大气相对湿度环境下,可以获得近饱和湿度状态下的气溶胶吸湿性质<sup>[6]</sup>;3)不直接测量粒子粒径,不受被测粒径大小的制约<sup>[26]</sup>。但激光雷达遥感气溶胶的吸湿性质也有其局限性,即测量过程中无法控制相对湿度和被测气溶胶的状态,因此需要在常规观测数据中,筛选符合条件的吸湿增长过程。

激光雷达遥感气溶胶吸湿性质的研究报道集中于激光雷达垂直指向方法的使用。为了获得相对湿度垂直分布,必须选择低云系覆盖的气象条件,利用云底作为饱和水汽的标定点,采用大气绝热假设计算得到相对湿度垂直廓线<sup>[25]</sup>。近地表至云底垂直方向的气溶胶被认为混合均匀,其干粒子的组分和尺度谱分布保持不变,根据垂直方向上气溶胶光学参数随相对湿度的变化,获得云下气溶胶的消光吸湿增长因子。该方法的局限性体现在:需要使用相对复杂的水汽-气溶胶激光雷达(很多观测站点仅具备米氏散射激光雷达),并且其体积较庞大,一般设计为垂直观测指向,改变观测指向较为困难;测量过程中需要满足低云系出现的气象条件,以及大气绝热假设、云下气溶胶混合均匀等假设<sup>[6,18-20,25]</sup>;低云的出现对利用激光雷达反演气溶胶光学参数的精度产生了较大的干扰。在大气水平分布均匀的条件下,水平探测的米氏散射激光雷达是一种可以定量探测气溶胶消光系数的有效手段。针对开放大气条件下多波长气溶胶消光吸湿增长因子观测手段的匮乏,本文使用相对常见的双波长米氏散射激光雷达,水平遥感近地表气溶胶消光系数,结合温湿度传感器实测的地表相对湿度,利用合理的数据筛选方法,获得双波长气溶胶消光吸湿增长因子,并分析其对波长的依赖特性。

## 2 实验方法

### 2.1 观测地点和仪器

观测点位于合肥市西郊的董铺水库。合肥地处江淮之间,四季分明且昼夜温差较大,观测点周边区域

的相对湿度变化剧烈,非常适合在开放大气环境下开展气溶胶吸湿增长性质的观测研究。观测使用了一台 532~1064 nm 双波长米氏散射激光雷达,其中 532 nm 通道具备偏振探测功能。该激光雷达以水平探测的方式,采用斜率法获取两个波长近地表气溶胶消光系数(距地面约 10 m)以及退偏振比(DE)和 Angstrom 波长指数(以下简称波长指数,AE),数据的时间分辨率为 5 min<sup>[30]</sup>。相对湿度来自同一观测点的气象站,数据的时间分辨率为 20 s,分析时将其插值到 5 min。PM<sub>2.5</sub> 干粒子质量浓度来自合肥市环境监测网(董铺水库站),由振荡天平颗粒物监测仪测得,数据分辨率为 1 h。为了追踪潜在的气溶胶来源,利用 HYSPLIT 模式(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory),对观测期间的气流来源进行了后向追踪。

## 2.2 数据筛选方法

为了保证粒子的吸湿作用是导致消光系数增大的主要原因,需要在合理判据的基础上,对激光雷达观测数据进行筛选。在激光雷达垂直观测法数据筛选判据的基础上<sup>[18,20]</sup>,考虑到激光雷达水平观测的技术特点,这里采取如下的数据筛选判据:1)根据斜率法反演气溶胶消光系数的要求,利用激光雷达距离平方校正信号,筛选气溶胶水平分布均匀的时间段;2)在满足步骤 1)的数据中,筛选相对湿度和消光系数同时出现递增的过程;3)在满足步骤 2)的数据中,筛选出 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度不变的过程;4)在满足步骤 3)的数据中,筛选粒子退偏振比呈递减趋势的过程(粒子吸湿增长导致其形状逐渐偏向于球形,因此随相对湿度的增加,退偏振比呈递减趋势)<sup>[20]</sup>。相比于激光雷达垂直观测方法,这里利用实测的相对湿度和质量浓度数据,无需做大气气溶胶垂直混合均匀和绝热的假设,因此测量数据质量得到了更加严格的约束。

激光雷达垂直观测吸湿性质的研究报道中,也有利用波长指数与相对湿度之间出现负相关性现象作为数据筛选的判据<sup>[18,20]</sup>。考虑到开放大气环境下,相对湿度与波长指数之间的变化规律是否符合负相关性与实际大气气溶胶的成分和尺度谱分布有关<sup>[31]</sup>,仍需要深入研究,因此这里不采用该判据。

作为数据筛选的示例,图 1 给出了对 2014 年 6 月 10 日 14:05 至 20:25 的个例进行数据筛选的过程。图 1(a)实心圆形点和空心圆形点,分别为 532 nm 和 1064 nm 波长气溶胶消光系数随时间的变化趋势。图 1(b)中,随着相对湿度(方形点)从 30% 增加至 60%,532 nm 和 1064 nm 消光系数均呈增大趋势,其中 532 nm 消光系数增加了 2.6 倍,1064 nm 消光系数增加了 2.9 倍。图 1(b)显示 PM<sub>2.5</sub> 干粒子的质量浓度(实心圆点)增加了约 2 倍,图 1(a)显示退偏振比(星形点)也呈明显的递增趋势,说明观测过程中非球形粒子持续增加。因此,本次个例中导致消光系数增加的主要原因是粒子吸湿增长和非球形粒子浓度的增加,故此类型数据将被剔除。

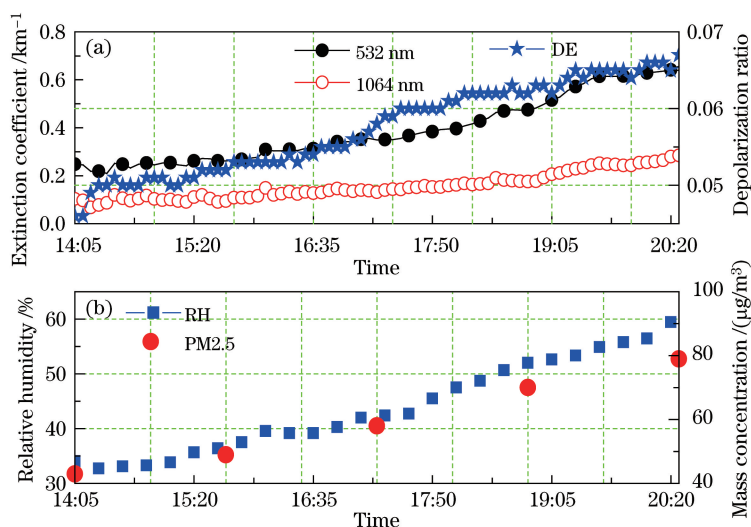


图 1 2014 年 6 月 10 日吸湿增长数据筛选个例

Fig. 1 Case study for selection of hygroscopic growth process at June 10th, 2014

需要指出的是,这里没有观测气溶胶粒子的尺度谱分布。为降低被测干粒子谱分布变化带来的影响,一方面筛选尽量短时间内的吸湿增长过程,认为数小时内干粒子尺度谱分布变化不大;另一方面,利用粒子退偏振比的变化规律剔除观测过程中干粒子尺度谱出现明显变化的个例。图 2 给出了对 2014 年 10 月 11 日

2:40 至 6:00 的个例进行数据筛选的过程。图 2(a)中,随相对湿度的增加,532 nm(实心圆形点)和 1064 nm(空心圆形点)波长的消光吸湿增长因子  $f$  明显增大,图中的  $f$  定义为相对湿度为  $X_{RH}$  时的粒子平均质量消光效率  $a(X_{RH})$  与相对湿度为 78% 时的粒子平均质量消光效率  $a(78\%)$  之比。图 2(b)显示,PM2.5 粒子质量浓度(圆形实心点)在  $39 \sim 44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之间变化,其平均值为  $(40.8 \pm 2.2) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,观测过程中气溶胶质量浓度变化很小。

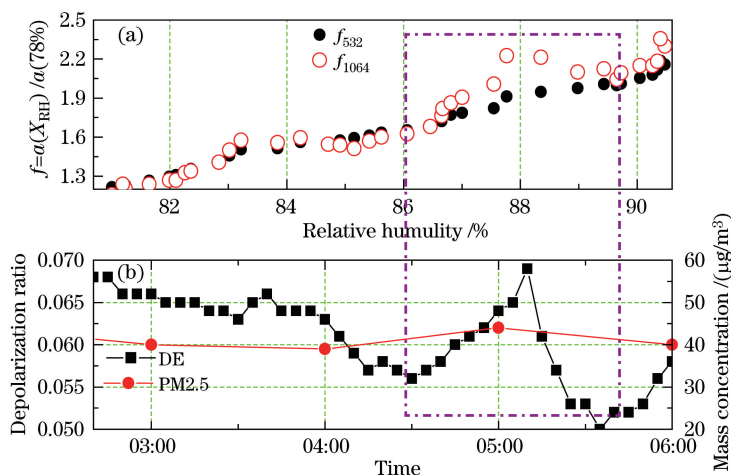


图 2 2014 年 10 月 11 日吸湿增长数据筛选个例

Fig. 2 Case study for selection of hygroscopic growth process at Oct. 10th, 2014

图 2(b)中退偏振比(方形点)虽然整体上呈下降趋势,但是图中方框内的时间段,退偏振比出现了明显的先增大后减小的变化,变化过程持续约 1 h。退偏振比的变化说明,随着时间的推移大气中非球形干粒子(通常为干粒子)出现了先增多后减少的过程。图 2 方框内的数据显示,1064 nm 波长吸湿增长因子的变化幅度远强于 532 nm,而且大气中大粒子的增加导致长波消光效率的增强。虽然测量过程中 PM2.5 质量浓度保持不变,但是非球形大粒子的这种变化将导致被调干粒子的尺度谱分布产生变化,因此此类数据也将被剔除。

### 3 典型观测结果

一般认为,在气溶胶粒子谱分布遵循容格分布的条件下,随着粒径的吸湿增长,粒子对长波的消光效率增加速度要快于短波,故长波消光吸湿增长因子的增加速率要快于短波,并且这种趋势在高相对湿度条件下愈加明显。在 2014 年 4 月至 6 月、10 月至 11 月间,暂停利用激光雷达垂直观测大气气溶胶的间隙,开展了短期的地表气溶胶水平观测实验。在上述观测数据中,筛选了 3 组典型的吸湿增长观测结果,每组数据由结果相同的两次个例组成,用于说明观测结果的可重复性。

#### 3.1 短波吸湿增长因子弱于长波

图 3(a)~(c)为 2014 年 4 月 7 日 15:00 至 22:00 的个例。随着相对湿度由 56.3% 增加至 85.3%,图 3(a)中 532 nm 吸湿增长因子(以  $f$  表示)增加至 2.6(实心圆点),1064 nm 吸湿增长因子增加至 3.7(空心圆点)。作为参考,图 3(a)中也给出了波长指数(星型点)观测结果,波长指数由 1.47 减小至 1.26。图 3(b)中退偏振比(方形点)由 0.098 递减至 0.033;PM2.5 质量浓度(圆形点)的平均值为  $(51.1 \pm 5.9) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图 3(c)为利用 HYSPLIT 模式计算的 72 h 内气流后向追踪,结果显示,观测期间气流来自观测点南方,且最近 24 h 内气流速度缓慢,因此观测点应当以本地的污染型气溶胶为主。

图 3(d)~(f)为 2014 年 6 月 21 日 23:00 至 22 日 6:30 的一次观测结果,相对湿度由 92.1% 增加至 96.0%,该过程出现了较高的相对湿度,各图曲线意义与图 3(a)~(c)相同。532 nm 吸湿增长因子增加至 2.5,1064 nm 吸湿增长因子增加至 4.1,波长指数由 0.97 减小至 0.34 左右;退偏振比由 0.11 减小至 0.076;PM2.5 质量浓度的平均值为  $(37.1 \pm 4.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。气流后向追踪结果显示,观测期间气流来自观测点东略偏南,72 h 气流后向追踪显示气流来自海洋方向。



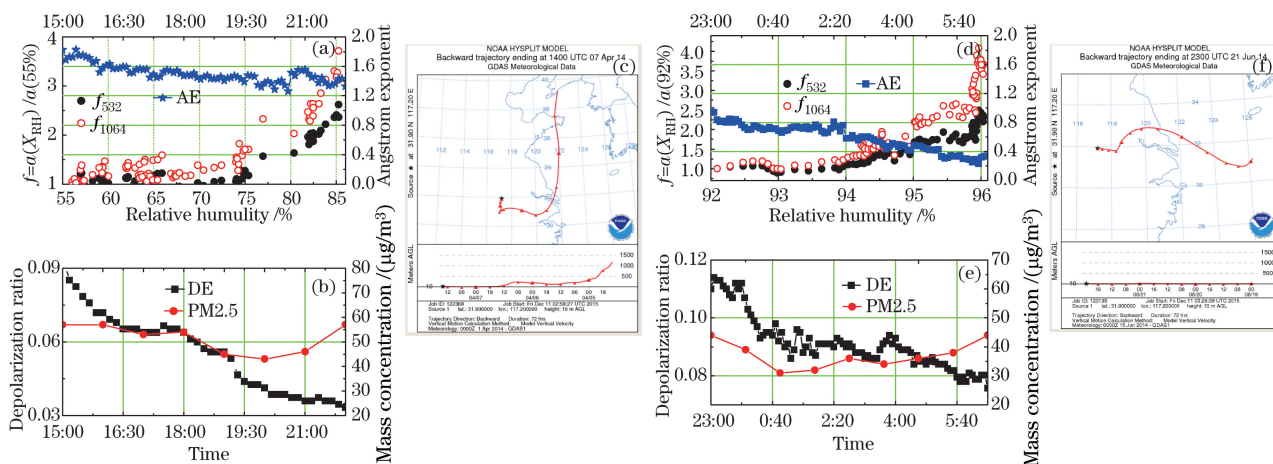


图 3 短波吸湿增长因子弱于长波吸湿增长因子。(a)~(c)2014 年 4 月 7 日；(d)~(f)2014 年 6 月 21 日至 22 日

Fig. 3 Hygroscopic growth factor at short wavelength weaker than that at long wavelength.

(a)~(c) Apr. 7th, 2014; (d)~(f) June 21th to 22th, 2014

图 3 中两次个例粒子退偏振比均在 0.11 以下,表明大气中不包含沙尘、扬尘、烟尘等明显的非球形粒子。两次个例颗粒物质量浓度均较小,属于合肥地区颗粒物质量浓度的本底水平<sup>[32]</sup>。但是,即使在大气清洁的条件下,粒子的吸湿作用也将导致消光系数成倍的增加,严重影响水平能见度。两次个例的另一个显著共同点是,1064 nm 波长的吸湿增长因子强于 532 nm 波长的。图 4 给出了两次个例  $f_{1064}$  同  $f_{532}$  的差值 ( $f_{1064} - f_{532}$ ),可见  $f_{1064}$  大于  $f_{532}$ ,并且随着相对湿度的增加,两波长吸湿增长因子的差值也呈增大趋势。

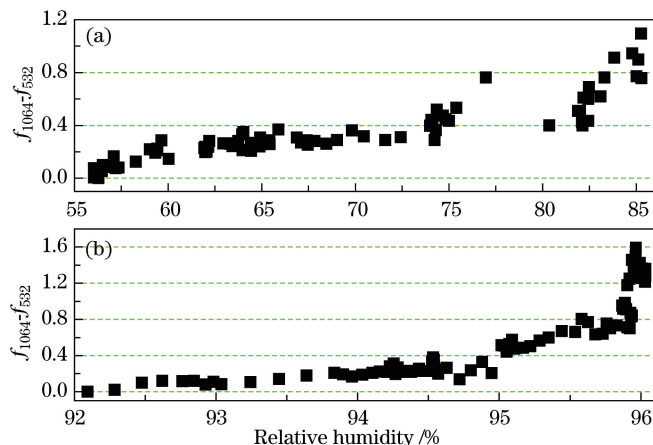


图 4 短波吸湿增长因子弱于长波时两波长吸湿增长因子差异。(a)2014 年 4 月 7 日；(b)2014 年 6 月 21 日至 22 日

Fig. 4 Difference of two-wavelength hygroscopic growth factor when hygroscopic growth factor at short wavelength is weaker than that at long wavelength. (a) Apr. 7th, 2014; (b) June 21th to 22th, 2014

图 3 中两次个例的波长指数与相对湿度之间相关系数分别为 0.63 和 0.83,呈较明显的负相关性。虽然两次观测期间气流的 backward 追踪来源不同,但气溶胶尺度谱都符合单模态分布,故符合合格尺度谱分布条件下波长指数的变化趋势。消光吸湿增长因子的波长依赖特性变化规律显示,随相对湿度的增加,长波的消光系数增加速度快于短波,导致长波的消光吸湿增长因子增加速度同样明显快于短波的。

### 3.2 短波吸湿增长因子强于长波

图 5(a)~(c)为 2014 年 5 月 14 日 18:00 至 22 日 20:30 的一次个例。随着相对湿度由 70.5%递增至 82.7%,532 nm 吸湿增长因子增加至 1.7,1064 nm 吸湿增长因子增加至 1.4,波长指数则出现了随相对湿度增加的现象,由 1.44 增加至 1.73 左右;退偏振比由 0.077 减小至 0.066;PM2.5 质量浓度的平均值为  $(50.3 \pm 5.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。气流 backward 追踪结果显示,观测时间段气流来自观测点西略偏北,以内陆陆地气溶胶为主。

图 5(d)~(f)为 2014 年 10 月 9 日 00:00 至 6:25 的一次个例。随着相对湿度由 77.5%递增至 92.6%,

532 nm 吸湿增长因子增加至 2.4, 1064 nm 吸湿增长因子增加至 1.8, 波长指数同样由 1.04 增加至 1.65; 退偏振比由 0.072 递减至 0.037; PM2.5 质量浓度的平均值为  $(68.7 \pm 4.4) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。气流后向追踪结果显示, 观测时间段内气流来自观测点东略偏南, 72 h 气流后向追踪来自海洋方向。

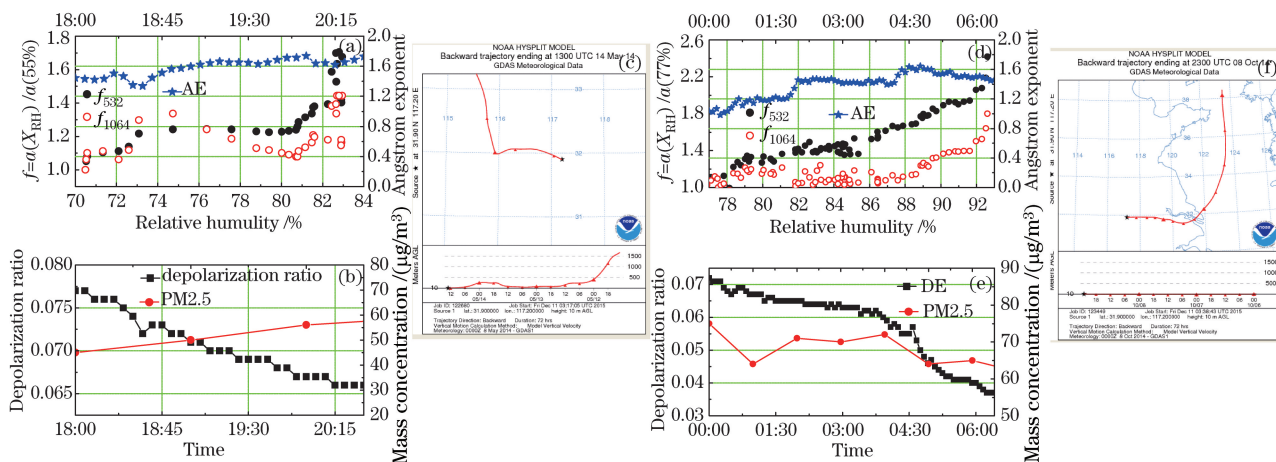


图 5 短波吸湿增长因子强于长波吸湿增长因子。(a)~(c)2014 年 5 月 14 日; (d)~(f)2014 年 10 月 9 日

Fig. 5 Hygroscopic growth factor at short wavelength stronger than that at long wavelength.

(a)~(c) May 14th, 2014; (d)~(f) Oct. 9th, 2014

图 5 中两次个例过程中, 虽然 PM2.5 质量浓度很低, 但是由于粒子吸湿作用的主导, 消光系数出现了成倍的增加。两次个例粒子退偏振比均在 0.1 以下, 表明大气中不包含沙尘、扬尘和烟尘等明显的非球形粒子。图 5 出现了 1064 nm 波长的吸湿增长因子低于 532 nm 波长的观测结果, 与图 3 给出的观测结果截然相反。图 6 给出了两次个例  $f_{1064} - f_{532}$  的结果(负值), 可见随着相对湿度的增加, 两波长吸湿增长因子差值的绝对值也呈上升趋势。

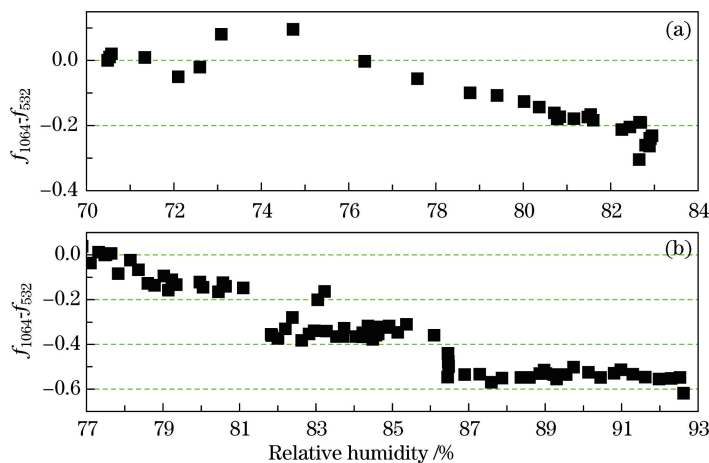


图 6 短波吸湿增长因子强于长波时两波长吸湿增长因子差异。(a)2014 年 5 月 14 日; (b)2014 年 10 月 9 日

Fig. 6 Difference of two-wavelength hygroscopic growth factor when hygroscopic growth factor at short wavelength is stronger than that at long wavelength. (a) May 14th, 2014; (b) Oct. 9th, 2014

值得注意的是, 图 5 中两次个例波长指数与相对湿度之间的相关系数分别为 0.81 和 0.69, 呈较明显的正相关性, 与图 3 中的观测结果截然相反。两次个例期间, 后向追踪显示气流的来源截然相反, 但是光学参数却显示了相似的变化趋势。引起这种现象的主要原因是, 开放大气环境下两次个例气溶胶尺度谱均出现了双模态或者多模态分布, 引起波长指数与相对湿度之间出现正相关性<sup>[30-31]</sup>, 导致短波的消光系数随相对湿度增加的速率快于长波的, 使得短波的消光吸湿增长因子增加速度快于长波的。

### 3.3 短波和长波吸湿增长因子相当

图 7(a)~(c)为 2014 年 10 月 27 日 1:45 至 3:35 的个例过程。随着相对湿度由 61.9% 增加至 88.8%,

532 nm 吸湿增长因子增加至 4.3, 1064 nm 吸湿增长因子增加至 4.6; 波长指数基本不变, 平均值为  $1.44 \pm 0.04$ ; 退偏振比由 0.1 减小至 0.04; PM2.5 质量浓度的平均值为  $(85.7 \pm 5.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。气流后向追踪结果显示, 观测期间气流来自观测点东北, 同样以内陆气溶胶为主。

图 7(d)~(f) 为 2014 年 11 月 07 日 3:00 至 5:20 个例过程。相对湿度由 77.5% 递增至 86.4%。其中 532 nm 吸湿增长因子增加至 1.7, 1064 nm 吸湿增长因子增加至 1.8; 波长指数基本不变, 平均值为  $1.52 \pm 0.03$ ; 退偏振比由 0.060 减小至 0.045; PM2.5 质量浓度的平均值为  $(90.5 \pm 2.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。气流后向追踪结果显示, 观测期间气流来自观测点东北, 与图 7(c) 相似, 也应以内陆气溶胶为主。

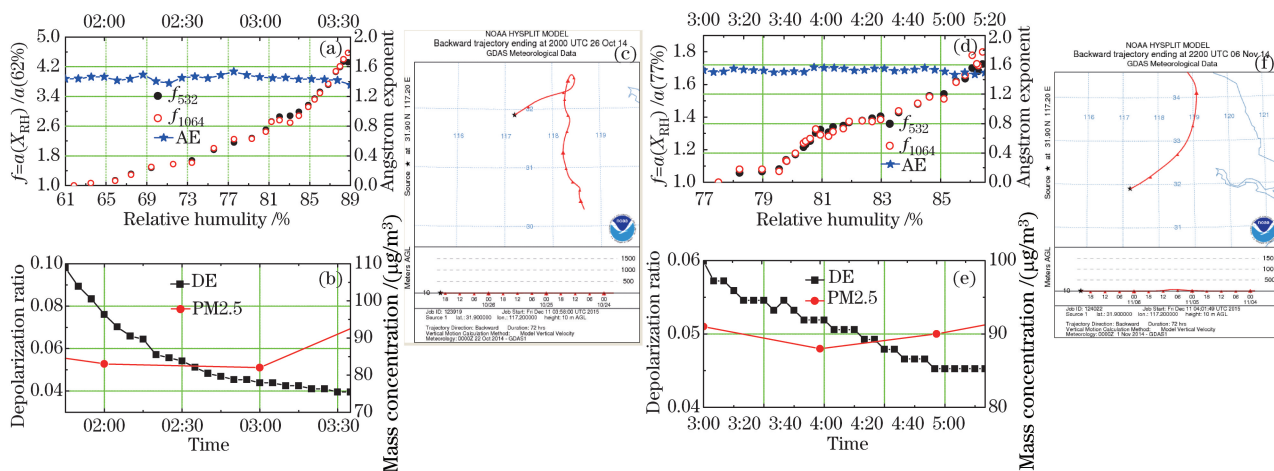


图 7 短波和长波吸湿增长因子相当。(a)2014 年 10 月 27 日;(b)2014 年 11 月 7 日  
Fig. 7 Hygroscopic growth factor at short wavelength equal with that at long wavelength.  
(a) Oct. 27th; 2014; (b) Nov. 7th; 2014

图 7 中的两次个例粒子的吸湿作用同样导致消光系数明显增加; 两次个例粒子退偏振比均小于 0.1, 表明大气气溶胶组分中不包含沙尘、扬尘等非球形粒子; 1064 nm 波长的吸湿增长因子与 532 nm 波长相当。图 8 给出了两次个例  $f_{1064} - f_{532}$  的结果, 可见随着相对湿度的增加, 两波长吸湿增长因子基本没有差别。

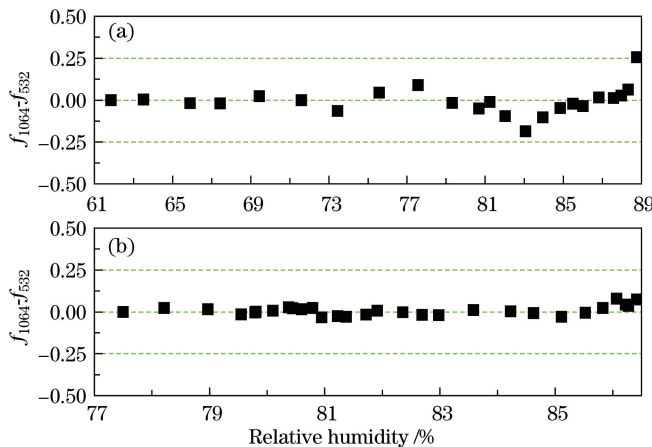


图 8 短波和长波吸湿增长因子相当时吸湿增长因子差异。(a)2014 年 10 月 27 日;(b)2014 年 11 月 7 日  
Fig. 8 Difference of two-wavelength hygroscopic growth factor when hygroscopic growth factor at short wavelength is equal with that at long wavelength. (a) Oct. 27th, 2014; (b) Nov. 7th, 2014

图 7 中的两次个例中, 波长指数也同样基本保持不变。波长指数与相对湿度之间相关系数均为 0.04, 无相关性。引起这种现象的主要原因可能是粒子谱分布出现了双模乃至多模分布, 两波长消光系数随相对湿度增加的增长速率几乎相当, 造成两波长吸湿增长因子增长趋势几乎没有差别。

## 4 结 论

本文报道了利用水平观测的双波长米氏散射激光雷达定量测量消光系数的方法。在同样出现低云系覆盖的气象条件下,该方法具备与水汽-气溶胶激光雷达垂直观测法相同的探测能力(认为该状态下近地表至云下气溶胶混合均匀),当不满足低云系覆盖的气象条件时,该方法仍然可以获得近地表气溶胶的消光吸湿特性。具体获得了以下结果:

1) 结合地表温湿度传感器实测的相对湿度数据,获得潜在的气溶胶吸湿增长过程;研究了吸湿增长过程的观测实例,提出了合理的数据筛选判据;通过数据筛选成功地获取了近地表气溶胶的双波长消光吸湿增长因子及其波长依赖特性。

2) 由于粒子吸湿增长作用的主导,即使是在大气中 PM<sub>2.5</sub> 干粒子质量浓度很低(图 3 和图 5)的 4 个个例中,532 nm 的气溶胶消光系数分别增加 1.7、2.4、2.5、2.6 倍和 1064 nm 的气溶胶消光系数分别增加 1.4、1.8、3.7、4.1 倍,显示粒子吸湿增长作用对消光系数的巨大影响。

3) 波长指数与相对湿度之间的变化规律,正相关、负相关和不相关 3 种观测结果均有出现。这种复杂的观测结果与开放大气条件下气溶胶成分和尺度谱分布的复杂性有关。波长指数与相对湿度之间的变化规律值得深入研究。

4) 由于消光吸湿增长因子同样是利用消光系数计算得到的,因此,吸湿增长因子的波长差异性与波长指数变化特征之间有一定关联,故不同粒子尺度谱分布对波长指数的影响同样反映在消光吸湿增长因子的波长差异性上。受地表气溶胶成分和尺度谱分布复杂性的影响,不仅出现了短波消光吸湿增长因子弱于长波的现象,还出现了短波消光吸湿增长因子强于长波以及两者相当的现象。因此,为了尽可能准确地掌握多波长消光吸湿增长因子的变化规律及其对波长的依赖特性,开展长期、高质量的观测实验是必须的。

**致谢:**感谢中国科学院大气光学与成分重点实验室吴晓庆研究员和谢晨波研究员提供的气象资料。

## 参 考 文 献

- 1 Gasparini R, Li R, Collins D R. Integration of size distributions and size-resolved hygroscopicity measured during the Houston Supersite for compositional categorization of the aerosol[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(20): 3285-3303.
- 2 Robert A, Kotchenmther P, Hobbs V, *et al.*. Humidification factors for atmospheric aerosol off the mid-Atlantic coast of united states[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104(2): 2239-2251.
- 3 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.
- 4 Pahlow M, Feingold G, Jefferson A, *et al.*. Comparison between lidar and nephelometer measurements of aerosol hygroscopicity at the southern great plains atmospheric radiation measurement site[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111(5): 237-253.
- 5 Graham Feingold. Aerosol hygroscopic properties as measured by lidar and comparison with *in situ* measurements[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D11): AAC1.
- 6 Massoli P, Bates T S, Quinn P K, *et al.*. Aerosol optical and hygroscopic properties during TexAQS-GoMACCS 2006 and their impact on aerosol direct radiative forcing[J]. *J Geophys Res*, 2009, 114(D7): D00F07.
- 7 Tao Jinhua, Wang Zifeng, Xu Qian, *et al.*. Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 12-24.  
陶金花, 王子峰, 徐 谦, 等. 北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究[J]. *遥感学报*, 2015, 19(1): 12-24.
- 8 Wang Z, Chen L, Tao J, *et al.*. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical and RH correcting method[J]. *Remote Sens Environ*, 2010, 114(1): 50-63.
- 9 Wang Zifeng, Chen Liangfu, Tao Jinhua. An empirical method of RH correction for satellite estimation of ground-level PM concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95: 71-81.
- 10 Wang J, Martin S T. Satellite characterization of urban aerosols: Importance of including hygroscopicity and mixing state in the retrieval algorithms[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(D17): D17203.
- 11 Hänel G. The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the RH at thermodynamic equilibrium with the



- surrounding moist air[J]. *Advances in Geophysics*, 1976, 19: 73-188.
- 12 Mackinnon D J. The effect of hygroscopic particles on the backscattered power from a laser beam[J]. *J Atmos Sci*, 1969, 26(3): 500-510.
- 13 Hand J L, Malm W C. Review of aerosol mass scattering efficiencies from ground-based measurements since 1990[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(D16): D16203.
- 14 Titos G, Lyamani H, Cazorla A, *et al.*. Study of the relative humidity dependence of aerosol light-scattering in southern Spain[J]. *Tellus B*, 2014, 66(8): 136-140.
- 15 Liu Xingang, Gu Jianwei, Li Yunpeng, *et al.*. Increase of aerosol scattering by hygroscopic growth: Observation, modeling, and implications on visibility[J]. *Atmospheric Research*, 2013, 132-133: 91-101.
- 16 Pan X L, Yan P, Tang J, *et al.*. Observational study of influence of aerosol hygroscopic growth on scattering coefficient over rural area near Beijing mega-city[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(19): 7519-7530.
- 17 Jung J, Lee K Y, Cayetano M G, *et al.*. Optical and hygroscopic properties of long-range transported haze plumes observed at Deokjeok Island off the west coast of the Korean Peninsula under the Asian continental outflows[J]. *J Geophys Res*, 2015, 120(17): 8861-8877.
- 18 Fernández A J, Apituley A, Veselovskii I, *et al.*. Study of aerosol hygroscopic events over the Cabauw experimental site for atmospheric research (CESAR) using the multi-wavelength Raman lidar Caeli[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 120: 484-498.
- 19 Wulfmeyer V, Feingold G. On the relationship between relative humidity and particle backscattering coefficient in the marine boundary layer determined with differential absorption lidar[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2000, 105(D4): 4729-4741.
- 20 Granados-Muñoz M J, Navas-Guzmán F, Bravo-Aranda J A, *et al.*. Hygroscopic growth of atmospheric aerosol particles based on active remote sensing and radio sounding measurements: Selected cases in southeastern Spain[J]. *Atmos Meas Tech*, 2015, 8: 705-718.
- 21 Stock M, Cheng Y F, Birmili W, *et al.*. Hygroscopic properties of atmospheric aerosol particles over the Eastern Mediterranean: Implications for regional direct radiative forcing under clean and polluted conditions[J]. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 4251-4271.
- 22 Snider J R, Petters M D. Optical particle counter measurement of marine aerosol hygroscopic growth[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2008, 8(7): 1949-1962.
- 23 Heintzenberg J, Mablign A, Birmili W. The connection between hygroscopic and optical particle properties in the atmospheric aerosol[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3649-3651.
- 24 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties during haze and fog weather[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.
- 25 Veselovskii I, Whiteman D N, Kolgotin A, *et al.*. Demonstration of aerosol property profiling by multiwavelength lidar under varying relative humidity conditions[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2009, 26(8): 1543-1556.
- 26 Zhang X, Massoli P, Quinn P K, *et al.*. Hygroscopic growth of submicron and supermicron aerosols in the marine boundary layer[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119(13): 8384-8399.
- 27 Day D, Malm W. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity: A comparison between measurements made at three different sites[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(30): 5169-5176.
- 28 Kotchenruther R, Hobbs P, Hegg D. Humidification factors for atmospheric aerosol off the mid-Atlantic coast of United States[J]. *J Geophys Res Atmos*, 1999, 104(D2): 2239-2251.
- 29 Rodrigues P, Landulfo E, Gandu A, *et al.*. Indirect aerosol hygroscopic growth observations with a backscattering lidar, part II: Five day breeze onset data analyses[C]. *SPIE*, 2011, 8182: 81820U.
- 30 Bo Guangyu, Xie Chenbo, Wang Bangxin, *et al.*. Case study of the relationship between aerosol Angstrom exponent and relative humidity[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0713002.  
伯广宇, 谢晨波, 王邦新, 等. 相对湿度影响地表气溶胶波长指数的个例研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0713002.
- 31 Loeb N G, Schuster G L. An observational study of the relationship between cloud, aerosol and meteorology in broken low-level cloud conditions[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(D14): D14214.
- 32 Zhang Siyuan, Wu Kaiya. Analysis of pollution characteristics and influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in Hefei [J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 41(1): 51-56.  
张思远, 吴开亚. 合肥市 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及影响因素分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 41(1): 51-56.