

# 相对湿度影响地表气溶胶波长指数的个例研究

伯广宇 谢晨波\* 王邦新 吴德成 钟志庆

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

**摘要** 利用双波长激光雷达观测合肥地区地表气溶胶的波长指数,根据观测期间的风向信息,选择了城市污染和乡村扬尘气溶胶作为两次典型个例,分析相对湿度(RH)对气溶胶波长指数(AE)变化规律的影响。观测结果表明,两次个例相对湿度对波长指数的影响均较明显,但是两次个例中波长指数与相对湿度之间的相关性明显不同。扬尘个例期间,当相对湿度在49.2%~91.9%之间变化时,波长指数的变化范围为0.75~1.98。污染个例期间,当相对湿度在58.7%~96.0%之间变化时,波长指数的变化范围为0.2~1.56。污染个例期间,相对湿度与波长指数之间呈负相关性,导致该现象的原因可能是,当粒子尺度谱满足Junge分布时,由于亲水型粒子吸湿增长,导致其粒径增大以及波长指数减小。值得注意的是,扬尘个例期间,相对湿度与波长指数之间却呈正相关性,导致该现象的原因可能是粒子尺度谱分布是由污染细粒子和扬尘粗粒子组成的多模态分布。

**关键词** 大气光学;气溶胶;激光雷达;相对湿度;波长指数;相关性分析

中图分类号 TN 958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0713002

## Case Study of the Relationship between Aerosol Ångström Exponent and Relative Humidity

Bo Guangyu Xie Chenbo Wang Bangxin Wu Decheng Zhong Zhiqing

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

**Abstract** In order to determine the relative humidity (RH) impact on the aerosol Ångström exponent (AE), a two-wavelength lidar is employed to observe the aerosol AE, two typical case studies have been given at Hefei area based on the wind direction, one represents pollution aerosol case, and the other represents rural aerosol case. The result indicates that during the two cases the RH has a strong effect on the variety of the AE, but totally different correlation between the two parameters can be found. During the rural case, the RH is between 49.2%~91.9%, the AE is between 0.75~1.98, and the AE of the pollution case is between 0.2~1.56 when the RH changed between 58.7%~96.0%. The pollution case presents a negative correlation between the RH and the AE, due to the aerosol hydrophilic growth with a Junge distribution. It is noteworthy that the rural case presents a positive correlation between the RH and the AE, the cause of this phenomenon is probably that particle size distribution is multimodal distribution composed of fine particles and coarse particles of dust pollution.

**Key words** atmospheric optics; aerosol; lidar; relative humidity; angstrom exponent; correlation analysis

**OCIS codes** 010.3640; 010.1110

### 1 引 言

大气气溶胶的Ångström消光波长指数(以下简称波长指数)是气溶胶光学特性研究领域的一个重要参数。波长指数的重要性一方面体现在它与气溶胶消光系数的光谱特征密切相关,可以用来内插或者外推消光系数<sup>[1]</sup>,另一方面体现在它与气溶胶的微物理特性有关系,可以用来定性的描述气溶胶的粒径大小<sup>[2]</sup>。波长指数的这些性质,使其在光电工程应用、大气辐射等研究方向起到重要的作用,因而针对波长指数及其影

收稿日期: 2015-03-10; 收到修改稿日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(41205019,41405032)

作者简介: 伯广宇(1980—),男,博士,副研究员,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: cbxie@aiofm.ac.cn

响因素的研究引起了人们的重视。一般认为波长指数受气溶胶类型、谱分布和相对湿度等内外因素的影响<sup>[1-3]</sup>,在这些影响因素中,相对湿度(RH)作为关键参数,起到联系气溶胶微物理特性和化学性质的作用,也是气溶胶光学特性的决定性参数之一。因此,观测相对湿度对波长指数的影响,对于研究气溶胶的微物理性质和消光系数的光谱特征均具有一定的科学意义。

在相对湿度影响波长指数特征的研究方向,已经有一些数值计算和观测研究的报道。一般认为,在粒子尺度谱满足 Junge 分布的条件下,粒子粒径随相对湿度的增大而增大,从而导致波长指数减小<sup>[4]</sup>。也有一些数值研究结果表明,在尺度谱为双模态甚至多模态谱分布的复杂条件下,相对湿度与波长指数之间正负相关性均可能出现<sup>[5]</sup>。也有学者利用地基、机载和星载的主动或者被动光学遥感技术,观测云周边高相对湿度环境对气溶胶波长指数的影响<sup>[6-8]</sup>,但是此类观测往往缺乏作为关键参数的相对湿度,故一般仅指出了气溶胶波长指数随离开云层边缘距离的变化规律。

对开放大气气溶胶波长指数的测量,一般采用太阳光度计或者垂直探测的激光雷达。由于太阳光度计测量的是整层气溶胶的波长指数,而垂直探测的激光雷达受探测盲区的限制,因而上述两种方法均无法获得地表气溶胶的有效观测数据。目前针对开放大气条件下观测地表气溶胶波长指数,以及相对湿度对波长指数影响的研究报道还不多见。本文利用一台 532~1064 nm 双波长激光雷达,水平指向观测地表气溶胶消光系数和波长指数,结合同步获取的地表相对湿度信息,尝试分析水汽对合肥地区典型类型气溶胶波长指数特性的影响。

## 2 观测地点、仪器和数据处理方法

### 2.1 观测地点和仪器

合肥地处江淮之间,市区拥有 500 万人口,近年来城区机动车保有量快速上升,一般认为合肥地区属于污染型陆地气溶胶。观测所在位置位于合肥市区西郊,如图 1 红色点所示的位置,该区域介于城市和乡村的交界处。观测区域西侧的地理特征为乡镇和农田,合肥绕城高速西距观测点约 4 km;观测区域东侧的地理特征为合肥市主城区。

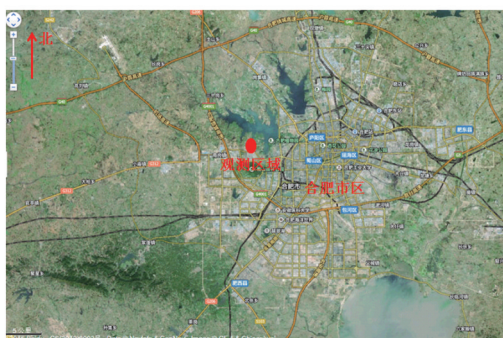


图 1 观测区域所在的地理位置

Fig.1 Location of the observation site

主要的观测仪器为一台 532~1064 nm 双波长米氏散射激光雷达<sup>[9]</sup>,该激光雷达以水平探测的方式获取地表气溶胶两个波长的消光系数,以及 Ångström 波长指数等光学参数,数据的时间分辨率为 5 min。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 波长单脉冲激光能量均为 100 mJ,接收望远镜口径为 200 mm。同步获取的气象资料来自同一观测点的气象站,温湿度数据来自 HMP155(A)温湿度传感器,风场数据来自超声波风速仪,数据的时间分辨率均为 10 min,进行数据相关性分析时,将相对湿度数据的时间分辨率插值到 5 min,达到与激光雷达的观测数据同步的目的。

### 2.2 数据处理方法

水平探测时激光雷达采用斜率法计算大气的消光系数,当大气气溶胶在水平尺度上分布均匀时,水平方向上的米氏散射激光雷达方程可写为<sup>[10-11]</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,一般城市等人类活动密集的地区地表气溶胶含量较高,532 nm 波长的分子消光系数比气溶胶小一个量级左右,故计算过程中忽略分子的消光系数。相对于垂直探测的米氏散射激光雷达,该方法反演气溶胶消光系数的过程无需假设消光后向散射比等未知信息,因而可以定量的获取气溶胶消光系数。利用反演得到的 532 nm 和 1064 nm 消光系数( $\alpha_{532}, \alpha_{1064}$ ),可以得到气溶胶波长指数为

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

### 3 两次典型观测个例

通常风向决定了地表气溶胶的来源,根据观测期间的风向信息,在2014年5~6月的观测数据中选择了两组具有代表性的个例,一组代表城市污染型气溶胶,另一组代表乡村型气溶胶。数据选择的依据是,每组个例地表风向持续一昼夜以上不变且风速基本稳定(平均值为 2 m/s 左右),认为上述条件下观测区域内气溶胶的来源基本稳定。为了对比不同类型气溶胶波长指数对相对湿度响应的差异,所选择的两次个例中,一组上风向气流来自合肥城区,以城市污染型气溶胶为主要成分;另一组上风向气流来自乡镇农田地区,以土壤扬尘气溶胶为主要成分。两次观测个例获得的激光雷达距离平方校正回波信号显示,观测期间大气回波无明显的突变信号,认为大气水平分布均匀并且符合斜率法计算大气气溶胶消光系数的条件。

#### 3.1 2014年5月观测个例

图2给出了2014.05.14T00:00~2014.05.15T00:00的观测结果(简称5.14个例),在满足风场的约束条件下,本次个例观测数据持续24 h。图2(a)给出了地表气溶胶光学参数的演变过程,其中黑线、红线和蓝线分别代表532 nm消光系数、1064 nm消光系数和波长指数。图2(b)给出了地表相对湿度和温度数据,其中黑线和红线分别为相对湿度和温度变化曲线。图2(c)中黑线和红线分别为地表风速和风向。

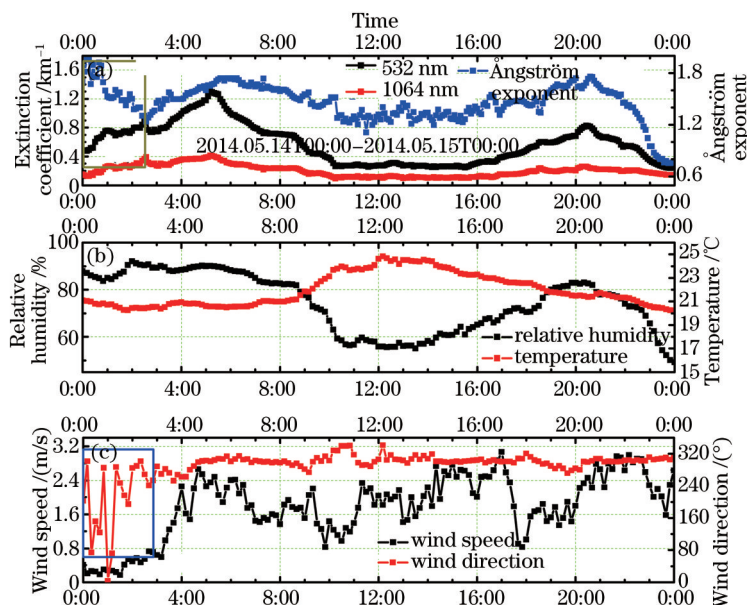


图2 5.14个例观测结果。(a) 气溶胶光学参数;(b) 温度和相对湿度;(c) 风速和风向

Fig.2 Observation result of 5.14 case study. (a) Aerosol optical properties; (b) temperature and relative humidity; (c) wind speed and direction

图2所示的气象要素和气溶胶光学参数的变化范围及平均值如表1所示。观测期间平均风向为  $289.7^\circ$ , 为西偏北风,除了观测数据初始的时间段风向变化较大外[图2(c)蓝框内],绝大多数时间段风向稳定。结合



图1所示的观测地点的地理位置可见,上风向所在地理位置的下垫面以农田和村落为主,气溶胶可能包含较多的土壤扬尘等大粒径颗粒物。观测期间的平均风速为1.78 m/s,平均风速较小,气溶胶的来源以上风向的局地气溶胶为主。

表1 5.14个例观测结果统计值  
Table 1 Statistic results on 5.14 case study

Parameter	Range	Average value
Wind speed /(m/s)	0.17~3.06	1.78±0.74
Temperature /°C	20.2~24.8	21.9±1.4
Relative humidity /%	49.2~91.9	74.4±12.4
Extinction coefficient at 532 nm /km <sup>-1</sup>	0.24~1.30	0.57±0.27
Extinction coefficient at 1064 nm /km <sup>-1</sup>	0.09~0.41	0.20±0.08
Ångström exponent	0.75~1.98	1.46±0.22

图2(a)中532 nm和1064 nm波长的气溶胶消光系数与相对湿度的变化趋势一致,也即相对湿度增大时,气溶胶包含的亲水型粒子因相对湿度增大而吸湿增长,引起气溶胶总的消光效率增强并导致消光系数增大;相对湿度减小时,气溶胶粒子风化引起消光效率减弱并导致消光系数减小。由相对湿度变化引起的波长指数变化明显,波长指数的变化范围为0.75~1.98,波长指数的平均值为1.46±0.22。值得注意的是,除了图2(a)棕色框内的数据外(与风向不稳定的时间段对应),波长指数的变化趋势与相对湿度一致,也即波长指数随相对湿度的增大(减小)成上升(下降)趋势,其原因随后分析。

### 3.2 2014年6月观测个例

图3给出了2014.06.21T16:00~2014.06.22T23:00的观测结果(以下简称6.21个例),在满足风场的约束条件下,本次个例观测数据持续30 h。各图曲线的定义与图2相同。

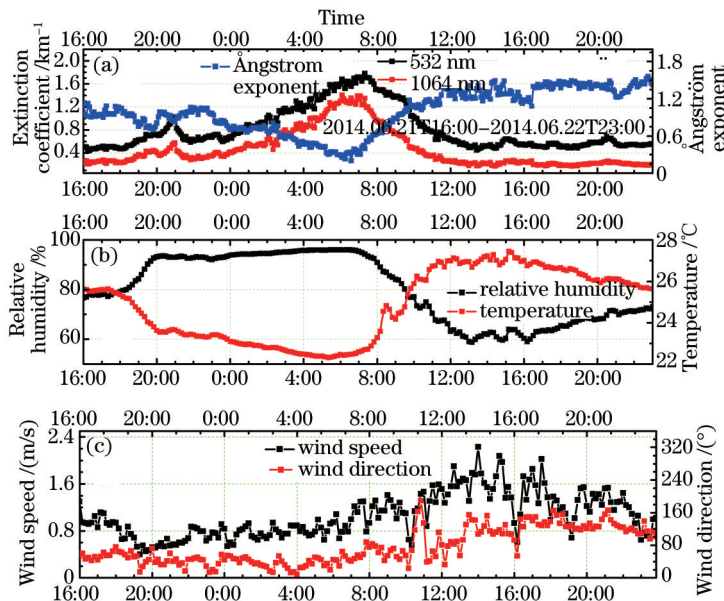


图3 6.21个例观测结果。(a)气溶胶光学参数;(b)温度和相对湿度;(c)风速和风向

Fig.3 Observation result of 6.21 case study. (a) Aerosol optical properties; (b) temperature and relative humidity; (c) wind speed and direction

图3所示的气象要素和气溶胶光学参数的变化范围及平均值如表2所示,观测期间平均风速为1.05 m/s,平均风向约为76.0°,为东偏北风,上风向所在的地理位置为合肥市市区,气溶胶类型以城市污染为主。本次个例期间平均相对湿度较5.14个例大,并且期间出现了相对湿度高达96%的状况,高相对湿度条件下气溶胶粒子的吸湿增长作用明显,导致其消光系数快速增大<sup>[12]</sup>。

受相对湿度变化的影响,波长指数的变化范围为0.2~1.56,相对湿度对波长指数大小的影响显著。本次个例期间,出现了相对湿度从90%增加至96%的过程,该过程中波长指数从0.9下降至0.2,显示粒子逐步吸湿增长成为大粒径的雾滴,之后随着相对湿度的下降波长指数上升明显。与5.14个例明显不同的是,观测

过程中出现了随相对湿度的增加(减小)而波长指数呈下降(上升)的趋势,这种观测现象符合一般预期<sup>[5]</sup>,也即当相对湿度增大时,由于气溶胶吸湿增长引起有效粒径增大,从而导致波长指数呈减小趋势。

表2 6.21个例观测结果统计值

Table 2 Statistic results on 6.21 case study

Parameter	Range	Average value
Wind speed / (m/s)	0.40~2.23	1.05±0.38
Temperature / °C	22.3~27.4	24.8±1.7
Relative humidity / %	58.7~96.0	80.1±13.2
Extinction coefficient at 532 nm / km <sup>-1</sup>	0.44~1.78	0.81±0.36
Extinction coefficient at 1064 nm / km <sup>-1</sup>	0.17~1.41	0.46±0.33
Ångström exponent	0.20~1.56	0.99±0.35

#### 4 相对湿度与波长指数的相关性分析

图4给出了两次观测个例中相对湿度与波长指数的相关性分析。图4(b)所示的6.21观测个例中,观测区域内气溶胶的来源以城市污染气溶胶为主,通常城市污染型气溶胶粒子的尺度谱分布可以较好的用Junge分布拟合<sup>[13]</sup>,因而波长指数可以较准确的反映气溶胶有效粒径的大小。粒子吸湿增长过程导致气溶胶有效粒径增大,波长指数随之减小。另一方面粒子风化过程导致气溶胶有效粒径减小,故波长指数随之增大。上述过程最终导致波长指数与相对湿度呈较强的负相关性,相关系数达到0.76。

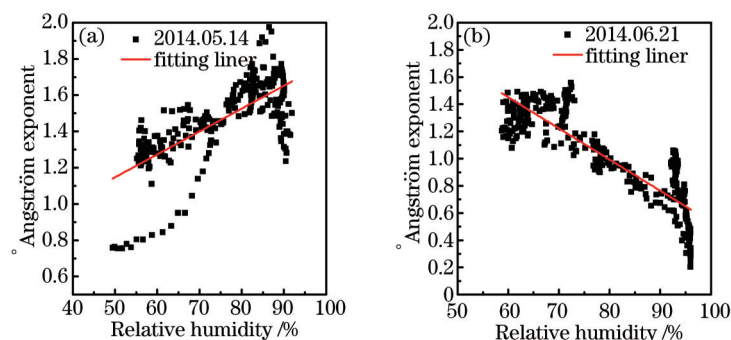


图4 波长指数与相对湿度的相关性。(a) 5.14观测个例;(b) 6.21观测个例

Fig.4 Correlation between the relative humidity and the Ångström exponent. (a) 5.14 case study; (b) 6.21 case study

而在图4(a)所示的5.14观测个例中,出现了与6.21个例明显不同的现象,也即波长指数与相对湿度成正相关,相关系数为0.51,导致该现象的原因可能是,观测点所在的地理位置,决定了粒子尺度谱分布可能是污染细粒子和扬尘粗粒子组成的双模态分布<sup>[13]</sup>。理论计算表明,相对湿度和波长指数之间出现正相关还是负相关性,取决于粒子尺度谱分布的具体情况<sup>[5]</sup>,但是由于缺乏粒子尺度谱的同步观测资料,具体原因仍待进一步分析。

#### 5 结 论

5.14个例气溶胶波长指数分布在0.75~1.98,平均值为1.46±0.22,6.21个例的波长指数的变化范围为0.2~1.56,平均值为0.99±0.35。观测结果显示,两次个例过程中波长指数受相对湿度变化的影响均较明显,但是两次个例之间波长指数与相对湿度之间的相关性则明显不同,5.14个例波长指数同相对湿度呈正相关性,而6.21个例波长指数同相对湿度呈负相关性。究其原因,两次观测个例气溶胶的来源不同,导致粒子尺度分布和成分存在差异,因而气溶胶光学参数对相对湿度的响应也是不同的,最终体现在相对湿度与波长指数的相关性出现了巨大差异。

#### 参 考 文 献

1 F Wagner, A M Silva. Some considerations about Ångström exponent distributions[J]. Atmos Chem Phys Discuss, 2007, 7: 12781-12805.

- 2 D G Kaskaoutis, H D Kambezidis, N Hatzianastassiou, *et al.*. Aerosol climatology: dependence of the Ångström exponent on wavelength over four AERONET sites[J]. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2007, 7: 7347–7397.
- 3 L Mona, A Amodeo, G D' Amico, *et al.*. Multi-wavelength Raman lidar observations of the Eyjafjallajökull volcanic cloud over Potenza, southern Italy[J]. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12(4): 2229–2244.
- 4 G L Schuster, O Dubovik, B N Holben. Ångström exponent and bimodal aerosol size distributions[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111(D7): 1–14.
- 5 N G Loeb, G L Schuster. An observational study of the relationship between cloud, aerosol and meteorology in broken low-level cloud conditions[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: D14214.
- 6 Ilan Koren, Lorraine A Remer, Yoram J Kaufman, *et al.*. On the twilight zone between clouds and aerosols[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(8): L08805.
- 7 Wenying Su, Gregory L Schuster, Norman G Loeb, *et al.*. Aerosol and cloud interaction observed from high spectral resolution lidar data[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(D24): D24202.
- 8 Varnai T, Marshak A. Global CALIPSO observations of aerosol changes near clouds[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 19–23.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties during haze & 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.
- 13 Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric Chemistry and Physics*[M]. Hoboken: Wiley-Inter-Science Publication, 1998: 367–369.

栏目编辑: 史 敏