

文章编号: 1001-3806(2018)06-0727-06

测污激光雷达探测气溶胶消光特性和 Ångström 指数

王杰^{1,2}, 陈亚峰^{1,2}, 刘秋武^{1,2}, 杨杰^{1,2}, 黄见^{1,2}, 胡顺星^{1*}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

摘要: 为了研究测污激光雷达对水平能见度和垂直气溶胶消光系数变化趋势的探测, 采用污染气体探测激光雷达, 以斜率法和 Fernald 方法, 反演了 301.5nm 和 446.6nm 在水平及垂直方向的消光系数, 以及波长的 Ångström 指数。结果表明, 水平方向上, 301.5nm 和 446.6nm 的消光系数和能见度随时间变化均保持一致性; 垂直方向上, 301.5nm 和 446.6nm 气溶胶消光系数随时空变化趋势相同, Ångström 指数随着时间的推移有所变化, 但空间变化趋势相同。该结果对分析差分吸收激光雷达修正气溶胶的影响是有所帮助的。

关键词: 激光技术; 气溶胶消光系数; 激光雷达; Ångström 指数

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.001

Detection of aerosol extinction characteristics and Ångström index by monitoring pollutants lidar

WANG Jie^{1,2}, CHEN Yafeng^{1,2}, LIU Qiuyu^{1,2}, YANG Jie^{1,2}, HUANG Jian^{1,2}, HU Shunxing¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to study the detection of horizontal visibility and vertical aerosol extinction coefficient by monitoring pollutants lidar, the extinction coefficients of 301.5nm and 446.6nm in horizontal and vertical directions and wavelength Ångström index were retrieved by the slope method and the Fernald method. The result shows that, in the horizontal direction, the extinction coefficients and visibility of 301.5nm and 446.6nm vary with time consistently. In the vertical direction, the extinction coefficients of 301.5nm and 446.6nm follow the same trend in time and space. The Ångström index has changed with the change of time. But the spatial change trend is the same. The results are helpful to correct the effect of analytical differential absorption lidar on aerosol.

Key words: laser technique; extinction coefficient of aerosol; lidar; Ångström index

引言

大气气溶胶是大气环境中组成复杂、危害较大的污染物之一, 一直是当今大气科学和环境科学等领域的重要研究内容^[1-2]。激光雷达因为具有时空分辨率高以及测量精度高等特点, 成为探测气溶胶分布的一

种重要的主动遥感工具^[3-5]。目前用于探测大气气溶胶的激光雷达主要是米散射激光雷达和偏振激光雷达, 米散射激光雷达可以获得气溶胶粒子的空间相对分布^[6-7], 偏振激光雷达可以获得气溶胶粒子的非球形特征^[8-9]。而多波长的激光雷达系统不仅可以获得不同波长的气溶胶消光系数, 并且可以依据不同波长的气溶胶消光系数算出表征粒子特性的 Ångström 指数等特性。

CHI 等人用研制的 532nm 和 1064nm 的双波长米散射激光雷达探测大气气溶胶消光特性^[10]。DI 等人利用多波长激光雷达 (355nm, 532nm, 1064nm) 探测多种天气气溶胶光学特性^[11]。本文中所介绍的污染气体探测激光雷达是中国科学院安徽光学精密机械研究

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项基金资助项目(41127901); 国家自然科学基金资助项目(41575032; 41505019)

作者简介: 王杰(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2017-01-12; 收到修改稿日期: 2018-03-30

所从2012年开始研发的新一代测污雷达^[12-14],利用该激光雷达对安徽淮南上空的大气进行探测,然后分析安徽淮南大气的气溶胶消光特性、能见度和 Ångström 指数变化规律。

1 测污激光雷达系统结构

该测污激光雷达系统包含4个激光发射波长,分

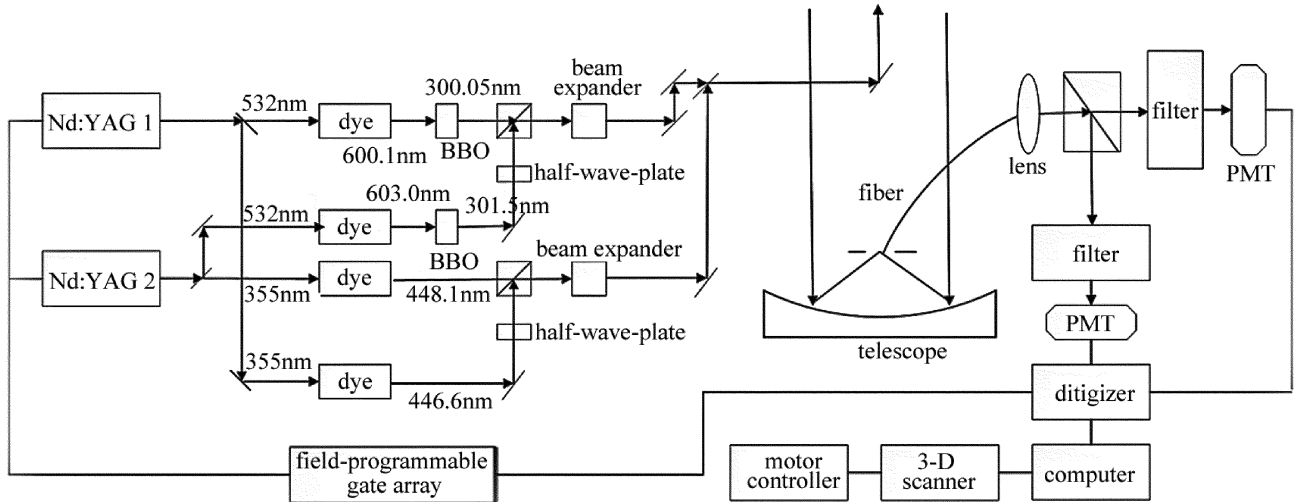


Fig. 1 Block diagram of monitoring pollutants lidar

系统采用2台固体Nd:YAG激光器抽运4台染料激光器方式产生所需波长,2台Nd:YAG激光器交替产生10Hz基频1064nm激光束,基频光1064nm激光束经过倍频晶体产生532nm的激光,然后,532nm激光与剩余的1064nm激光同时穿过三倍频晶体产生355nm的激光,这样,2台固体Nd:YAG激光器产生了4束激光。其中两束交替出射的355nm激光分别去抽运两台染料激光器,分别产生446.6nm作为弱吸收波长 $\lambda_{2,off}$ 和448.1nm作为强吸收波长 $\lambda_{2,on}$,用来测量边界层大气二氧化氮浓度的分布。另外两束交替出射的532nm激光分别去抽运两台染料激光器,分别产生600.1nm和603nm的激光束,600.1nm和603nm的激光束,再分别经过BBO晶体进行倍频,产生300.05nm作为强吸收波长 $\lambda_{1,on}$ 和301.5nm作为弱吸收波长 $\lambda_{1,off}$,用来测量边界层的大气二氧化硫。这样探测二氧化硫和二氧化氮的激光束已经获得。

446.6nm的激光经过半波片后和448.1nm激光经合束和伽利略式扩束器6倍扩束,导入45°转向镜。301.5nm的激光也经过半波片后和300.05nm激光经合束和伽利略式扩束器6倍扩束,也导入45°转向镜。然后这4束激光一起经过3维扫描子系统的两块大口径平面镜射向大气中,4束波长的光经过传输路径上

别是300.05nm,301.5nm,448.1nm和446.6nm,其中探测二氧化硫的波长对为 $\lambda_{1,on} = 300.05\text{nm}$ 和 $\lambda_{1,off} = 301.5\text{nm}$,探测二氧化氮的波长对为 $\lambda_{2,on} = 448.1\text{nm}$ 和 $\lambda_{2,off} = 446.6\text{nm}$ 。系统主要由激光发射、信号接收和信号采集及系统控制三大主要部分组成,其具体系统结构框图如图1所示。图中BBO(barium boron oxide)为偏硼酸钡,PMT(photomultiplier)是光电倍增管。

的大气分子和大气气溶胶所吸收和散射,大气后向散射光被350mm的3维近牛顿式扫描望远镜接收。通过计算机改变3维扫描系统的电机转动位置,可以改

Table 1 Specification of monitoring pollutants lidar

transmitter(SO ₂)	
wavelength	300.05nm(on),301.5nm(off)
laser class	USA continuum 8010 Nd:YAG laser(532nm) pump, Germany radiant dye laser(600.1nm,603nm)
repetition	10Hz
energy	8mJ
transmitter(NO ₂)	
wavelength/nm	448.1nm(on),446.6nm(off)
laser class	USA continuum 8010 Nd:YAG laser(355nm) pump, Germany radiant dye laser(446.6nm,448.1nm)
repetition	10Hz
energy	5mJ
receiver	
telescope	near newtonian, focus length 750mm, diameter 350mm, field of view 0.2mrad~2mrad
optical filter	central wavelength 300.75nm, band width 3.0nm (SO ₂), block OD ₃ (200nm~1100nm), $\Phi = 25.4\text{mm}$; central wavelength 447.50nm, band width 3.0nm (NO ₂), block OD ₅ (200nm~1100nm), $\Phi = 25.4\text{mm}$
detector (PMT)	9142QB, $\Phi = 25\text{mm}$, 185mm~650mm, rise time < 50ns, gains 10 ⁵ ~10 ⁶ , voltage 750V~1200V
A/D	PCI-9826H, 20MS/s, channel number 4(16bit)

变激光发射的方向,从而实现大气水平、垂直和不同角度空间的探测。为了减小大气背景噪声的干扰,在望远镜后面采用小孔光阑限制视场角为 $0.2\text{mrad} \sim 2\text{mrad}$ 。然后通过一根芯径为 1.5mm 的传能光纤导入准直透镜进行准直,准直后的光经过分光系统将信号分成 SO_2 通道和 NO_2 通道,两个通道上分别加有相对应的滤光片和衰减片,两通道的信号分别被对应的 PMT 转换为电信号,然后由模/数 (analog/digital, A/D) 数据采集卡记录并将数据储存在计算机中,最后由计算机进行处理和显示,系统的主要参量如表 1 所示。

2 测污激光雷达数据处理与反演

激光脉冲经过大气传输后,接收到的散射信号 P_z 符合激光雷达方程,其一般形式如下所示:

$$P_z(z, \lambda_0) = \frac{C\beta(z, \lambda_0)}{z^2} \exp\left[-\int_0^z 2\alpha(z, \lambda_0) dz\right] \quad (1)$$

式中, $P_z(z, \lambda_0)$ 为激光雷达接收距离 z 处的大气后向散射回波信号 (W); C 为激光雷达系统常数 ($\text{W} \cdot \text{km}^3 \cdot \text{sr}$); $\alpha(z, \lambda_0)$, $\beta(z, \lambda_0)$ 分别为距离 z 处大气总的消光系数 (km^{-1}) 和后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), 若将大气中气体分子和气溶胶粒子分开加以考虑, 则 $\alpha(z, \lambda_0) = \alpha_m(z, \lambda_0) + \alpha_a(z, \lambda_0)$, $\beta(z, \lambda_0) = \beta_m(z, \lambda_0) + \beta_a(z, \lambda_0)$, 其中 $\alpha_m(z, \lambda_0)$ 和 $\beta_m(z, \lambda_0)$ 分别为距离 z 处空气分子的消光系数 (km^{-1}) 和后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), $\alpha_a(z, \lambda_0)$ 和 $\beta_a(z, \lambda_0)$ 分别为 z 处大气气溶胶的消光系数 (km^{-1}) 和后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)。该测污激光雷达主要是探测大气中的 SO_2 和 NO_2 , 因此在测量大气污染气体的情况下, 大气的消光系数可写成表达式 $\alpha(z, \lambda_0) = \alpha_g(z, \lambda_0) + N(z)\sigma(\lambda_0)$, 其中 $N(z)$ 为待测气体的分子数密度, $\sigma(\lambda_0)$ 为待测气体的吸收截面, $N(z)\sigma(\lambda_0)$ 为待测气体对激光的消光系数, $\alpha_g(z, \lambda_0)$ 大气中除待测气体外的其它大气成分对激光的消光系数。若 $N(z)\sigma(\lambda_0)$ 小于或远小于 $\alpha_g(z, \lambda_0)$, 则大气波动带来的影响就很大。在这种情况下, 大气的微小波动就会引起污染物浓度的很大变化。但从另外一方面考虑, 如果 $N(z)\sigma(\lambda_0) \geq \alpha_g(z, \lambda_0)$, 则污染气体的消光系数不能忽略。在该测污激光雷达中, 假设 3 种气体的体积分数都为 40×10^{-9} , 则二氧化硫和二氧化氮以及臭氧相对应波长的吸收截面和消光系数如表 2 所示。

Table 2 Molecular extinction coefficient of three kinds of atmospheric pollutants at the corresponding wavelength

pollutant	NO_2	SO_2	O_3
wavelength/nm	301.5	446.6	301.5
$N(z)\sigma(\lambda_0)/\text{km}^{-1}$	0.014	0.043	0.025

从表中可以看出, 当 3 种气体体积分数都为 40×10^{-9} 时, SO_2 , NO_2 和 O_3 对 301.5nm 的激光消光比较接近, 而实际情况是 SO_2 的体积分数低于 40×10^{-9} , NO_2 的体积分数接近 40×10^{-9} , O_3 的体积分数高于 40×10^{-9} , 因此在算气溶胶消光系数时, SO_2 和 NO_2 的影响可以忽略不计, 而 O_3 需要依据实际体积分数去考虑其影响。

2.1 水平消光系数及能见度

由于该系统进行水平探测时, 气溶胶的消光系数远大于其他分子的消光系数, 在进行数据处理的时候可以用斜率法, 则消光系数可表示为^[15]:

$$\alpha_h = -\frac{1}{2} \frac{d[\ln X(z)]}{dz} \quad (2)$$

式中, $X(z) = P_z(z, \lambda_0) z^2$ 。斜率法忽略了激光雷达接收的回波信号中的小尺度的起伏, 算出的是一段均匀大气的消光系数。确定了水平大气消光系数 α_h , 则可以求得大气水平能见度 V_m 。根据能见度理论, 均匀大气条件下的大气能见度方程为:

$$V_m = \frac{3.912}{\alpha_h} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q \quad (3)$$

式中, q 是系数, 其取值取决于不同的能见度 V_m , 常用的是 KRUSE 等人给出的值。当能见度良好时, $q = 1.6$; 当能见度一般时, $q = 1.3$; 当能见度较差时; $q = 0.585 V_m^{1/3}$ 。

2.2 垂直气溶胶消光系数

对于垂直的大气消光系数的探测, 由于不同高度上气溶胶的消光系数变化很大, 当达到一定高度后, 气溶胶消光系数和大气空气分子的消光系数在同一个数量级上, 此时气溶胶和空气分子的后向散射系数、消光系数要分开处理, 可以使用 Fernald 积分法处理数据。Fernald 积分法是激光雷达方程各种反演方法中具有代表性也是最常用的一种方法。

在激光雷达方程(1)式中, 空气分子的后向散射系数 $\beta_m(z, \lambda_0)$ 和消光系数 $\alpha_m(z, \lambda_0)$ 可由标准大气模式通过瑞利散射理论计算得到。在利用 Fernald 方法反演大气气溶胶后向散射系数时, 需要假设空气分子消光后向散射比为 S_2 和气溶胶消光后向散射比 S_1 , 其 $S_2 = \alpha_m(z, \lambda_0) / \beta_m(z, \lambda_0) = 8\pi/3$ ^[16], 气溶胶消光后

向散射比 $S_1 = \alpha_a(z, \lambda_0) / \beta_a(z, \lambda_0)$, 假设 S_1 为一不随高度变化的常数, 中国大气气溶胶雷达比在 $40 \sim 55$ ^[17] 间变化, 这里取 $S_1 = 50 \text{sr}$ 。

由于 Fernald 方法的前向积分比较发散, 一般使用

$$\alpha_1(z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_2(z) + \frac{X(x) \exp\left[-2(S_1/S_2 - 1) \int_{z_c}^z \alpha_2(z) dz\right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_1(z_c) + (S_1/S_2) \alpha_2(z_c)} - 2 \int_{z_c}^z X(x) \exp\left[-2(S_1/S_2 - 1) \int_{z_c}^z \alpha_2(z) dz\right]} \quad (4)$$

2.3 气溶胶 Ångström 指数

Ångström 指数是最常用的大气污染指数, 其与大气气溶胶的平均半径有着密切的关系。一般情况下, Ångström 指数在 $0 \sim 4.0$ 之间变化, 当 Ångström 指数接近于 4 时, 气溶胶粒子半径很小, 激光与气溶胶作用接近分子散射的情况; 当 Ångström 指数接近于 0 时, 气溶胶粒子半径很大, 此时气溶胶粒子的半径远远大于入射的激光波长。对于多波长系统, 依据算出的不同波长的后向散射系数可以算出 Ångström 指数, 其表达式如下所示:

$$A(z) = -\frac{\ln[\beta_{a,\lambda_1}(z) / \beta_{a,\lambda_2}(z)]}{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)} \quad (5)$$

式中, $\beta_{a,\lambda_1}(z)$ 和 $\beta_{a,\lambda_2}(z)$ 分别表示不同波长 λ_1, λ_2 对应的气溶胶的后向散射系数。

3 数据处理与分析

该测污激光雷达目前位于安徽淮南大气科学研究院内, 自建成以来, 长期坚持对污染气体的常规监测, 积累了大量的数据, 利用该激光雷达在同一天既进行水平测量又进行垂直测量。对于获取的信号, 为了提高信噪比, 每组信号各 6000 个脉冲(对应的采集时间为 10min)平均而成。对采集的数据进行处理可以得到水平大气消光系数及大气能见度, 同时也可得到垂直气溶胶消光系数及 Ångström 指数的分布。

3.1 水平数据处理与分析

2016-11-01T19:47 ~ 20:36 利用该激光雷达对安徽淮南大气研究院内的大气进行了水平观测实验。图 2 中给出了 2016-11-01T19:47, 测污激光雷达测量的大气水平后向散射回波信号 $\ln[P(z)z^2]$ 和距离 z 的关系曲线。从图 2 中可以看出, 在 0.8km 到 2.4km 的范围内, $\ln[P(z)z^2]$ 与 z 呈现很好的线性关系。由于 300.05nm 和 448.1nm 分别对应二氧化硫和二氧化氮的强吸收线, 为了尽量减小二氧化氮和二氧化硫的影响, 因此选择 301.5nm 和 446.6nm 来反演水平的大气消光系数。从图 3 中的拟合曲线可以看出, 在 0.8km ~

后向积分, 其后向积分分解式如下式所示^[14], 对于标定高度 z_c 的选取, 一般在对流层顶附近, 可通过选取近乎不含气溶胶的清洁大气层所在的高度来确定。

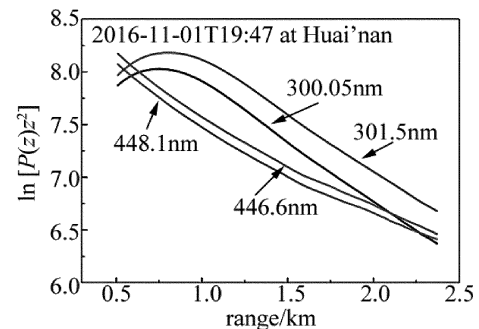


Fig. 2 Relationship between echo signal $\ln[P(z)z^2]$ and distance z of atmospheric horizontal

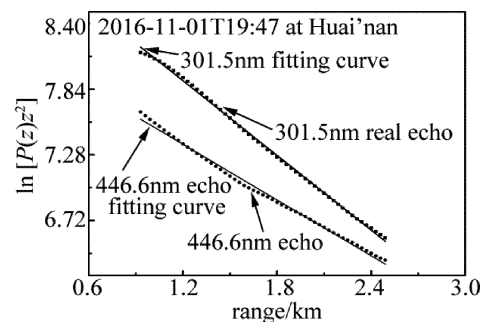


Fig. 3 The fitting curve of echo signal $\ln[P(z)z^2]$ and distance z of atmospheric horizontal at 301.5nm and 446.6nm

2.4km 的范围内, $\ln[P(z)z^2]$ 与 z 呈现很好的线性关系, 拟合直线斜率的一半即为 301.5nm 和 446.6nm 波长对应的大气水平消光系数 $\alpha_{301.5} = 0.520 \text{km}^{-1}$ 和 $\alpha_{446.6} = 0.383 \text{km}^{-1}$ 。通过计算得到 301.5nm 和 446.6nm 两波长对应的大气水平能见度 R , 分别为 16.47km 和 13.39km。

图 4 中给出了 2016-11-01T19:47 ~ 20:36 用该激光雷达所测量的数据计算出的 301.5nm 和 446.6nm 两个波长对应的大气水平能见度。从图中可以看出, 随着大气的波动, 虽然两个波长对应的大气水平能见度变化幅度不一样, 但是两个波长对应的大气水平能见度在一定程度上保持一致性。根据当时气象站发布的 19:00 和 20:00 两个时刻能见度分别为 14.8km 和 11.4km, 说明反演结果的准确性, 本文中所介绍的激光雷达能够实时监测能见度的变化。

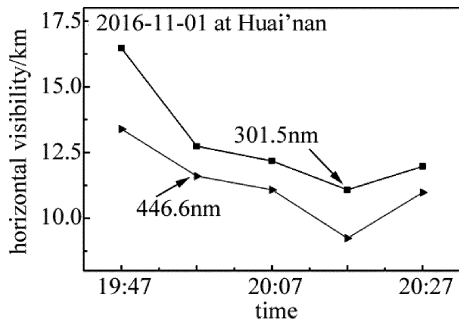


Fig. 4 The atmospheric level of visibility at 301.5nm and 446.6nm changes with time

3.2 垂直数据处理与分析

2016-11-01T21:10 ~ 22:20 利用该激光雷达对安徽淮南大气研究院内的大气进行了垂直观测实验。图 5a 为根据 21:10 ~ 22:20 所得数据反演出的 301.5nm 波长气溶胶的垂直消光系数廓线,图 5b 为根据 21:10 ~ 22:20 所得数据反演出的 446.6nm 波长气溶胶的垂直

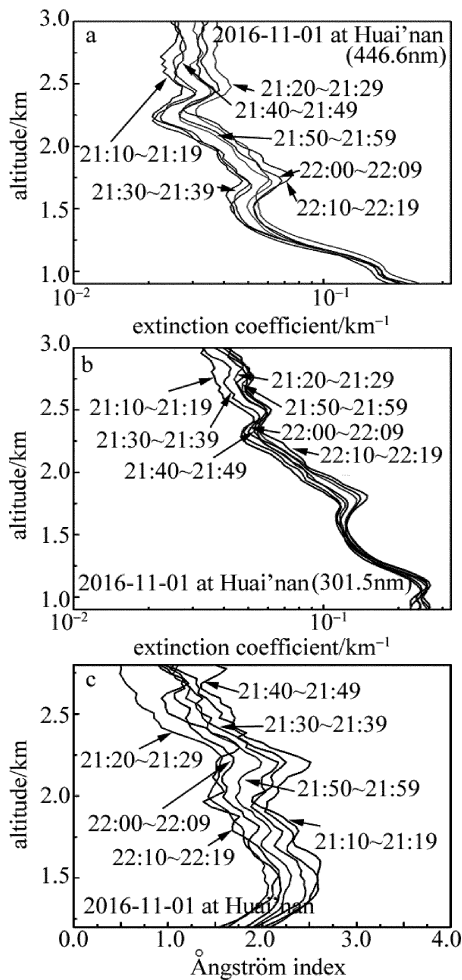


Fig. 5 Spatial and temporal distribution of aerosol extinction profile and corresponding Ångström index
 a—aerosol extinction profile at 446.6nm b—aerosol extinction profile at 301.5nm c—Ångström index

消光系数廓线。从图中可以看出,随时间的变化,301.5nm 和 446.6nm 分别反演出的气溶胶垂直消光廓线变化趋势基本一致,说明这段时间 3km 以下大气趋于平稳。另外,对于同一时刻,301.5nm 和 446.6nm 相对应的气溶胶垂直消光廓线变化趋势也基本相同,说明反演出的数据比较准确。图 5c 为根据 21:10 ~ 22:20 所得数据算出的 Ångström 指数,从图中可以看出 Ångström 指数随着时间的推移有所变化,但其空间变化趋势相同。

图 6 为 2016-11-01T21:10 所得数据反演出的 301.5nm 和 446.6nm 波长的气溶胶消光系数和对应的 Ångström 指数。从图中可以看出,两波长的消光系数趋势基本一致,用两波长算出来的 Ångström 指数在 1.2km ~ 2.8km 的范围内波动较大,从 1.2km ~ 1.5km 之间 Ångström 指数逐渐增大,气溶胶粒子半径逐渐减小,从 1.5km ~ 2.3km 之间 Ångström 指数比较稳定在 2 附近波动,气溶胶粒子半径在这一段区间内比较稳定。从 2.3km ~ 2.8km 之间 Ångström 指数逐渐减小,气溶胶粒子变大,可能有两个因素造成的,首先由于 3km 以下左右的近地面层,受人为源和自然源影响最大,以及风的影响,活跃的对流层会使得部分气溶胶粒子向更远的高度蔓延,另外随着高度增加,激光雷达的回波信号信噪比减小,而 Ångström 指数对于信噪比较敏感,在高空会存在一定的误差。

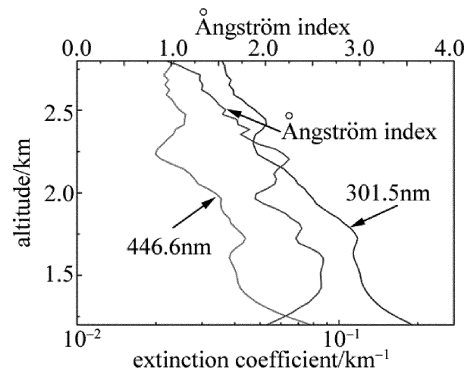


Fig. 6 Aerosol extinction profile and corresponding Ångström index at 2016-11-01T21:10

4 结 论

利用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的污染气体探测激光雷达回波数据,以斜率法反演了 301.5nm 和 446.6nm 在水平方向上的大气消光系数及能见度,以 Fernald 方法反演了 301.5nm 和 446.6nm 在垂直方向上的气溶胶消光系数和 Ångström 指数。结果表明,水平方向上,301.5nm 和 446.6nm 的大气

消光系数和能见度随时间变化均保持一致性;垂直方向上,301.5nm和446.6nm气溶胶消光系数随时空变化趋势相同,Ångström指数随着时间的推移有所变化,但空间变化趋势相同。在接下来的工作中需要将O₃对气溶胶消光系数的影响考虑进去,更准确地反演出气溶胶消光系数和Ångström指数的分布,进一步可以修正气溶胶对反演SO₂和NO₂的影响。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Ch G, ZHANG Y J, HAN D W, *et al.* Monitoring for the particles emitted by vehicle with lidar[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(2):130-133 (in Chinese).
- [2] YAN Sh Sh, LI H H. Determination of geometrical form factor of a lidar by means of Raman-Mie method [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4):511-514 (in Chinese).
- [3] CHI R L, WU D Ch, LIU B, *et al.* Dual-wavelength mie lidar for measuring the whole tropospheric aerosols[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(3): 179-186 (in Chinese).
- [4] MAO M J, WU Y H, QI F D, *et al.* Mobile dual-wavelength mie lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(5): 677-680 (in Chinese).
- [5] WANG Q M, ZHANG Y M. Development of meteorological lidar[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3):246-249 (in Chinese).
- [6] ZHOU J, YUE G M, JIN Ch J, *et al.* Two-wavelength mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10):1412-1417 (in Chinese).
- [7] LIU J, HUA D X, LI Y, *et al.* Design of a compact Mie lidar system [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2007, 23(1):1-5 (in Chinese).
- [8] IWASAKA Y, HAYASHIDA S. The effects of the volcanic eruption of St. Helens on the polarization properties of stratospheric aerosols-lidar measurement at Nagoya[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1981, 59(4):611-614.
- [9] LIU D, QI F D, JIN Ch J, *et al.* Polarization lidar observations of cirrus clouds and asian dust aerosols over Hefei[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(6):1093-1100 (in Chinese).
- [10] CHI R L, WU D Ch, LIU B, *et al.* Dual-wavelength Mie lidar observations of tropospheric aerosols spectroscopy and spectral analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1468-1472 (in Chinese).
- [11] DI H G, HOU X L, ZHAO H, *et al.* Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength mie lidar [J]. *Acta Physics Sinica*, 2014, 63(24): 248-255 (in Chinese).
- [12] HUANG J, HU Sh X, CAO K F, *et al.* Design of three dimensional scanning control system for air pollution monitoring Lidar based on LabVIEW [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(2):124-129 (in Chinese).
- [13] LIN J M, CAO K F, HU Sh X, *et al.* The experiment study of SO₂ measurement by differential absorption lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3):872-879 (in Chinese).
- [14] LIU Q W, WANG X B, CHEN Y F, *et al.* Detection of atmospheric NO₂ concentration by differential absorption lidar based on dye lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 338-345 (in Chinese).
- [15] CHEN M, SUN D S, LI H J, *et al.* Detective method and analysis of atmospheric slant visibility for lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2):156-160 (in Chinese).
- [16] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [17] ZHANG Zh Y, SU L, CHEN L F. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5):513002(in Chinese).