

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.01.002

激光雷达探测整层大气昼夜气溶胶光学厚度

汪惜今^{1,2}, 徐青山^{1*}, 范传宇^{1,2,4}, 程晨³, 戚鹏^{1,2,5}, 徐赤东¹

(1 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所基础科学研究中心, 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

3 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031;

4 皖西学院电气与光电工程学院, 安徽 六安 237012;

5 安徽建筑大学电子信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为丰富整层大气气溶胶光学厚度测量手段, 提出了一种综合微脉冲激光雷达与地面能见度测量数据的探测方法。该方法首先利用激光雷达数据反演得到气溶胶垂直消光系数廓线, 据此计算出气溶胶标高; 再利用能见度和消光系数的关系得到近地面水平方向的消光系数; 最后, 将近地面消光系数和标高结合, 从而得到整层大气气溶胶光学厚度。将该方法应用于合肥地区, 成功得到该地区整层大气气溶胶光学厚度的昼夜变化趋势, 验证了该方法的可适应性。

关键词: 气溶胶光学厚度; 气溶胶标高; 激光雷达; 能见度

中图分类号: P407

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)01-014-011

Lidar detection of diurnal variation of whole atmosphere aerosol optical depth

WANG Xijin^{1,2}, XU Qingshan^{1*}, FAN Chuanyu^{1,2,4}, CHENG Chen³,

QI Peng^{1,2,5}, XU Chidong¹

(1 Centre for Basic Science, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences,
Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

4 College of Electrical and Photoelectrical Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China;

5 School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to enrich the measurement methods of aerosol optical depth of the whole atmosphere

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (2016YFE0201400), 中国科学院合肥研究院院长基金资助 (YZJJ2021QN01)

作者简介: 汪惜今 (1996-), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: xijin@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 徐青山 (1965-), 安徽霍邱人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气订正方面的研究。

E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-04-15; 修改日期: 2021-05-19

*通信作者。

layer, a detection method integrating micro-pulse lidar and surface visibility data is proposed. In the method, the aerosol vertical extinction coefficient profile is retrieved from lidar data firstly, and the aerosol scale height is calculated accordingly. Then, the relationship between visibility and extinction coefficient is used to obtain the surface horizontal extinction coefficient. Finally, the aerosol scale height is combined with surface extinction coefficient to obtain the aerosol optical depth of the entire atmosphere. This method was applied to Hefei area, China, and the diurnal variation trend of the entire atmospheric aerosol optical depth in this area was successfully obtained, which verifies the applicability of the method.

Key words: aerosol optical depth; aerosol scale height; lidar; visibility

0 引言

大气气溶胶是液态或固态微粒在空气中的悬浮体系,是地球大气的主要成分之一^[1]。气溶胶通过对太阳辐射能的吸收和散射影响气候变化^[2]。气溶胶对太阳辐射的影响通常采用气溶胶光学参数来表征。针对大气气溶胶光学参数的探测,一直是大气科学领域学者的密切关注对象。气溶胶光学厚度(AOD)表征了气溶胶对太阳辐射的衰减特性,是气溶胶光学参数中的关键参数。

AOD定义为沿着传播路径,由大气柱中的气溶胶引起的消光量。探测AOD的技术手段主要分为被动探测技术和主动光学探测技术。被动探测技术包括太阳光度计探测、月光和星光探测,太阳光度计应用广泛、稳定性强,但是无法在夜间进行观测;月光和星光探测能够在夜晚探测AOD,是夜间气溶胶被动遥感手段的有效补充,但其工程应用仍在探索之中。激光雷达作为一种主动探测工具,具备昼夜观测能力,为夜间观测气溶胶光学参数提供了一种有效手段。王珍珠等^[3]使用米散射激光雷达在北京地区进行了探测,指出大气边界层内的气溶胶粒子浓度较高,大气边界层高度在夏季相对稳定。周碧等^[4]利用连续5年的激光雷达资料,反演得到兰州地区的气溶胶消光系数垂直廓线,指出消光系数的反演会受到沙尘等特殊天气的影响。

在气溶胶消光系数廓线遵循指数型分布的情形下, Penndorf^[5]指出消光系数减少至地面 $1/e$ 时的高度称为气溶胶标高,结合激光雷达探测数据,可以获得AOD。Qiu等^[6]分析了1994—2001年中国11个站点的季节性气溶胶标高和消光系数廓线的特征,得出气溶胶标高变化与地域以及季节密切相关,多日数据平均值反演得出的消光系数更符合指数型分布。范伟等^[7]根据大气AOD和近地面水平能见度的测量结果,得出了气溶胶随时间、季节以及地理位置变化的规律:秋季内陆地区标高最大,冬季次之,夏季沿海地区气溶胶标高最小。李成才等^[8]应用MODIS遥感产品对北京及周边地区的气溶胶进行了分析,发现受沙尘暴天气的影响,春季气溶胶标高较高,夏季由于混合层高度较高,气溶胶标高明显高于冬季;此外,将AOD和能见度拟合得到的AOD产品,在同一季节内进行对比,不同季节内进行校准,可用于研究地面污染等有关问题。韩永等^[9]利用能见度仪和太阳辐射计获得了气溶胶标高水平方向上的变化特征,指出气溶胶标高与波长成反比,夏季气溶胶标高小于冬季,但是由于观测条件限制无法得出夜间的气溶胶标高。

为了验证激光雷达用于整层大气AOD测量的可行性,胡顺星等^[10]将雷达所得结果与太阳辐射计的测量数据进行了分析对比,发现两者具有较好的一致性,证明将激光雷达用于测量整层大气AOD的方法可行。陈莎莎等^[11]利用Fernald后向积分法反演得出气溶胶垂直消光系数廓线,并将消光系数廓线分为四个不同的类型,从而拟合得出气溶胶标高,计算出整层大气AOD,与太阳高度计所测整层大气AOD进行对比,平均相

对误差小于6.7%, 一致性较好。

本文利用激光雷达进行昼夜连续观测气溶胶光学参数的特性, 得出气溶胶垂直方向上的消光系数廓线, 并在此基础上得出气溶胶标高; 进而基于地面能见度数据推算出近地面消光系数, 将二者相结合, 计算得出整层大气 AOD; 最后以合肥地区一个月的观测数据为例, 初步尝试分析了整层大气 AOD 的昼夜变化特征。

1 仪器和基本原理

1.1 仪器

实验采用波长为 532 nm 的微脉冲激光雷达 (MPL) 进行探测, 用于研究合肥地区大气气溶胶的光学特性。MPL 精度高、体积小、移动性好, 对颗粒物、大气能见度等可开展连续观测工作, 获得其时空分布特征和变化规律^[12]。

激光进入大气后, 会受到传输路径上气溶胶粒子以及空气分子的衰减, 发生弹性散射, 最终被探测器接收。激光雷达方程可表示为^[13]

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

式中 $P(z)$ 是距离 z 处的返回信号; C 为常数, 其值与雷达系统有关; $\beta(z)$ 即大气后向散射系数, $T(z) = \exp\left[-\int_0^z \sigma(z) dz\right]$ 为大气透过率, 其中 $\sigma(z)$ 为大气消光系数。同时, 考虑到大气反向散射包括气溶胶和空气分子两部分的贡献, 而大气消光系数为气溶胶消光系数和空气分子消光系数之和, 因此可将式 (1) 表示为

$$P(z) = Cz^{-2}[\beta_a(z) + \beta_m(z)]T_1^2(z)T_2^2(z), \quad (2)$$

式中 $\beta_a(z)$ 和 $\beta_m(z)$ 分别为气溶胶和空气分子在高度 z 处的后向散射系数, $T_1(z) = \exp\left[-\int_0^z \sigma_a(z) dz\right]$ 为气溶胶透过率, $T_2(z) = \exp\left[-\int_0^z \sigma_m(z) dz\right]$ 为空气分子透过率。

1.2 基本原理

已有的研究表明, 气溶胶浓度随高度呈指数型下降, 从而气溶胶消光系数 σ_z 随高度变化也遵循指数型下降^[14], 其表达式为

$$\sigma_z = \sigma_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad (3)$$

式中 σ_0 为近地面消光系数, H 为气溶胶标高。

光学厚度 τ 是消光系数在垂直方向上的积分, 可以表示为

$$\tau = \int_0^\infty \sigma_z dz = \int_0^\infty \sigma_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right) dz = \sigma_0 H. \quad (4)$$

消光系数的反演一般有斜率法^[15]和 Fernald 法^[16]。通常情况下, 斜率法常用于水平探测, 前提是大气均匀分布, 而 Fernald 法常用于垂直探测。吕立慧等^[17]对这两种激光雷达反演算法进行了对比, 指出 Fernald 法更适用于非理想状态下消光系数的反演, 相对误差较小。

近地面消光系数可以利用激光雷达进行水平测量获得, 但由于不可能频繁交替测量垂直和水平数据, 因

此可以使用地面能见度数据推算近地面消光系数。已有研究表明, 利用能见度计算得出的近地面消光系数和激光雷达水平方向测得的消光系数具有较好的一致性^[18,19]。根据 Koschmieder 定律, 能见度 V 可表示为

$$V = \frac{-\ln \varepsilon}{\sigma}, \quad (5)$$

式中 ε 定义为人眼视角阈值, 取值为 0.02^[20], 由此可得

$$\sigma_0 = \frac{3.912}{V}. \quad (6)$$

根据安徽省气象观测站 (58321) 提供的合肥城区的近地面能见度资料, 利用式 (6) 可计算得出近地面消光系数。

基于垂直方向上的气溶胶消光系数廓线, 可以求解得出气溶胶标高。利用 Fernald 后向积分法可计算得出气溶胶消光系数垂直廓线, 其计算公式为

$$\sigma_a(r) = -\frac{S_a}{S_m} \sigma_m + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \sigma_m(r) dr\right]}{\frac{P(r_c)r^2}{\sigma_a(r_c) + \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(r_c)} + 2 \int_r^{r_c} P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \sigma_m(r) dr\right] dr}, \quad (7)$$

式中 $\sigma_a(r)$ 和 $\sigma_m(r)$ 分别代表气溶胶粒子、空气分子在高度 r 处的消光系数; S_a 是气溶胶消光后向散射比, 本实验的观测点为合肥城郊, 该地区的气溶胶消光后向散射比 S_a 通常取值为 50 sr 较为合理^[21]; S_m 是空气分子消光后向散射比, 通常取 $8\pi/3$ 。 r_c 为标定高度, 一般选择气溶胶含量微乎其微的大气层所在高度, 并且可以认为这一高度上 $[P(r)r^2]/\beta_m(r)$ 有最小值, 本研究选取 4~6 km 为标定高度; $\sigma_a(r_c)$ 和 $\sigma_m(r_c)$ 分别为标定高度处气溶胶粒子和空气分子的消光系数的初值, 标定高度处气溶胶消光系数的初值由该处的气溶胶散射比 R 决定 $[R = 1 + \beta_a(r_c)/\beta_m(r_c) = 1.01]$, 空气分子的消光系数则取决于大气模式^[22]。

2 数据处理及结果分析

利用 MPL 2020 年 1 月的观测数据开展数据处理和分析验证工作。观测数据的时间分辨率为 1 min, 能见度的观测数据同步为 1 min 数据。

2.1 气溶胶消光系数廓线的计算

利用 MPL 接收到的回波信号, 通过 Fernald 法求解出气溶胶消光系数垂直廓线。图 1 (a)、(b) 分别给出了北京时间 2020 年 1 月 2 日夜间 01:42 和白天 08:30 垂直方向上的气溶胶消光系数廓线, 其中所选两个时刻的有效数据均满足晴天无云条件。对两组观测数据分别进行指数型拟合, 发现观测期间气溶胶消光系数垂直分布基本符合指数型分布特征。对比实测的昼夜两组气溶胶消光系数廓线, 可以看出, 白天气溶胶消光系数廓线层结构较为丰富, 没有夜间平滑, 这可能是由于白天对流层的垂直活动较为剧烈, 这种气溶胶消光系数廓线的昼夜差异将会影响昼夜气溶胶标高的变化。

2.2 气溶胶标高的计算

气溶胶标高的计算采用陈莎莎等^[11]提出的方法, 将气溶胶消光系数廓线分为四种类型。

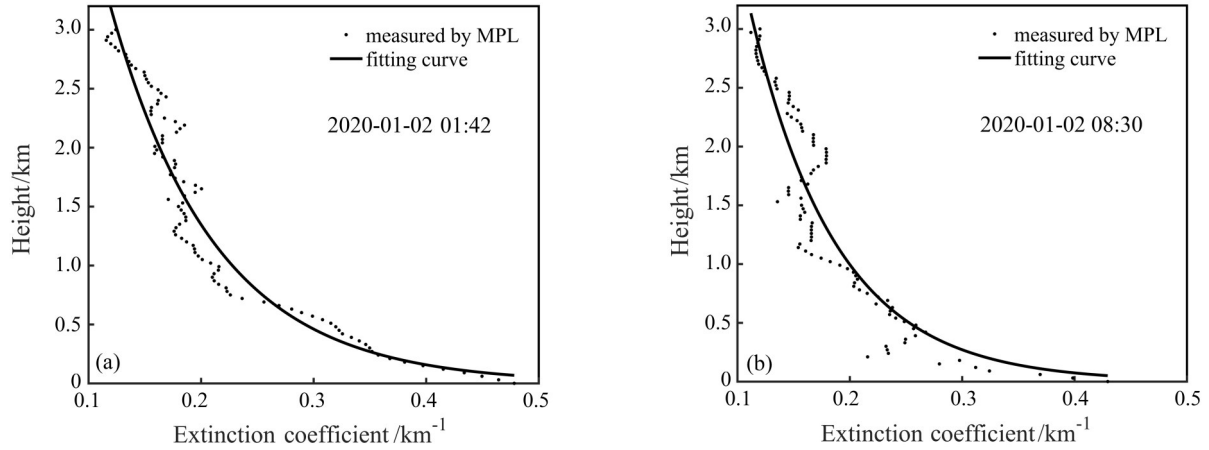


图 1 气溶胶消光系数廓线。(a) 夜间; (b) 白天

Fig. 1 Aerosol extinction coefficient profiles. (a) Night; (b) day

1) 如果气溶胶消光系数廓线在垂直方向上大致服从指数型变化, 那么可以根据式 (3) 直接采取指数拟合的方法得出标高。

2) 如果气溶胶消光系数廓线在边界层上方呈现指数型变化, 边界层内气溶胶充分混合, 则有

$$\sigma_z = \begin{cases} \sigma_0, & z < H_1 \\ \sigma_{H_1} \exp\left(-\frac{z-H_1}{H'_a}\right), & z \geq H_1 \end{cases} \quad (8)$$

标高 $H = H'_a + H_1$ 。

3) 如果边界层内气溶胶分布不均匀, 在某一高度层内有积累, 则有

$$\sigma_z = \begin{cases} \sigma_0 \exp\left(-\frac{z}{H_a}\right), & z < H_1 \\ \sigma_0, & H_1 \leq z < H_2 \\ \sigma_0 \exp\left(-\frac{z}{H'_a}\right), & z \geq H_2 \end{cases} \quad (9)$$

标高 $H = \left[\int_{H_1}^{H_2} \sigma_z dz - \int_{H_1}^{H_2} \sigma_0 \exp\left(-\frac{z}{H'_a}\right) dz \right] / \sigma_0 + H'_a$ 。

4) 若地面有轻度污染, 则有

$$\sigma_z = \begin{cases} \sigma_0, & z < H_1 \\ \sigma_{H_1} \exp\left(-\frac{z-H_1}{H'_a}\right), & z \geq H_1 \end{cases} \quad (10)$$

标高 $H = \left(H'_a \sigma_{H_1} + \int_0^{H_1} \sigma_z dz \right) / \sigma_0$ 。

针对上述四种方法拟合计算出的气溶胶标高与太阳光度计的结果进行对比, 发现两者具有较好的相关性, 证明上述方法可行。

利用 Fernald 后向积分法得到 2020 年 1 月 2 日气溶胶消光系数廓线, 通过对消光系数进行处理得到气溶

胶标高。图 2 为利用 MPL 测得的全天数据进行处理得到的当日气溶胶标高, 数据按小时平均。从图中可以看出, 气溶胶标高值呈现早晚低、中午高的趋势, 凌晨气溶胶标高值较小, 随着时间的推移, 气溶胶标高值白天逐渐升高, 夜晚又逐渐减小, 昼夜气溶胶标高值存在差异。

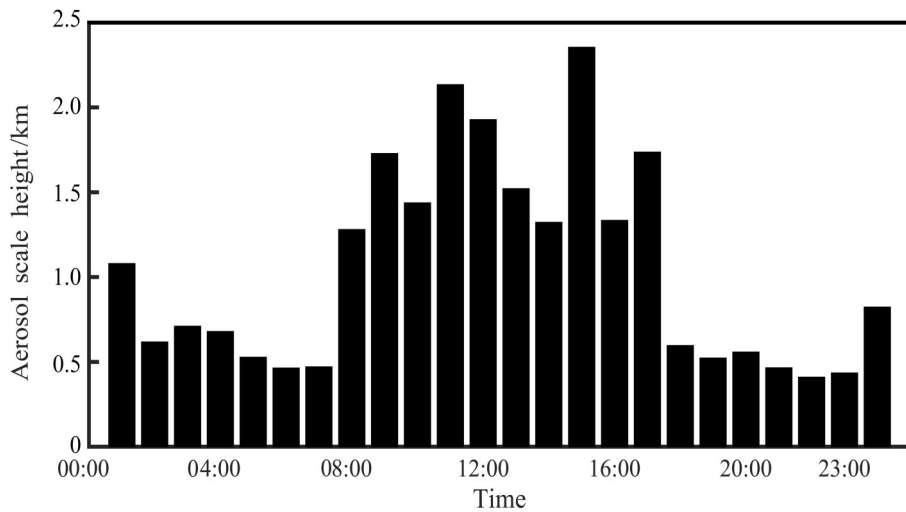


图 2 气溶胶标高的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of aerosol scale height

2.3 近地面消光系数的计算

根据合肥地区 2020 年 1 月份的能见度数据, 利用式 (6) 计算得出 1 月 2 日的近地面消光系数, 如图 3 所示。可以看出, 近地面消光系数从 00:00 开始由 0.5 缓慢减小, 然后不断升高, 在 12:00 达到当日最高值 0.637, 之后又逐渐减小, 到了夜晚又呈现增大趋势。将能见度得到的消光系数和激光雷达 MPL 得到的结果进行对比, 结果如图 4 所示。由图可知, 相关系数为 0.8821, 证明利用能见度获得消光系数是可靠的。

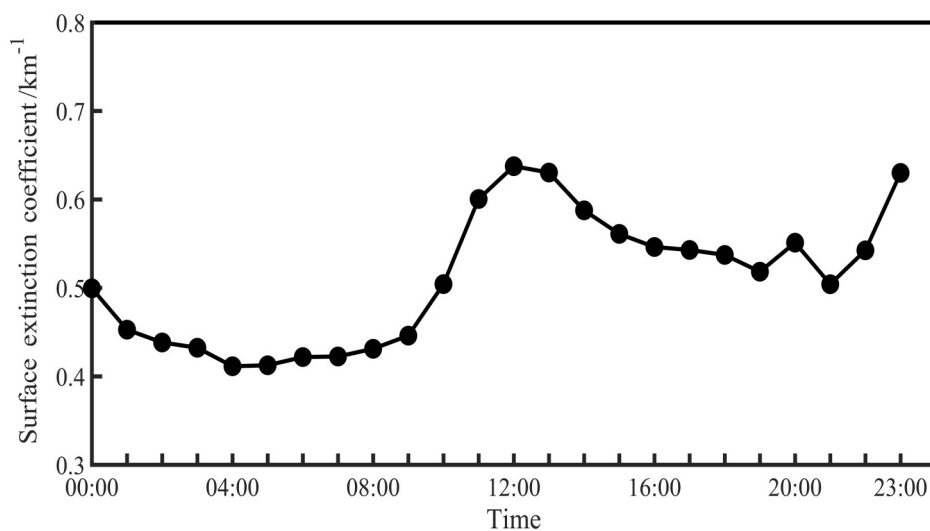


图 3 近地面消光系数分布

Fig. 3 Distribution of surface extinction coefficient

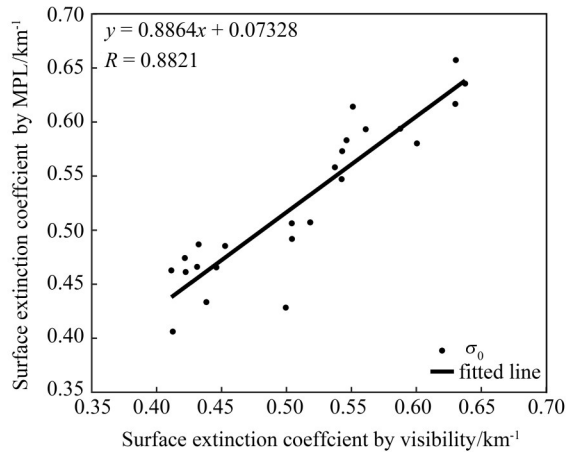


图4 近地面消光系数结果(能见度仪和MPL)对比

Fig. 4 Comparison of surface extinction coefficients from MPL and visibility

2.4 AOD日变化的计算

通过前面计算所得气溶胶近地面消光系数和标高, 根据式(4)可以得出1月2日合肥地区整层大气AOD分布, 结果如图5所示。由图可知, 1月2日的AOD呈现单峰型, 凌晨AOD值较小, 在05:00为当天最小值0.191; 随着太阳的升起, AOD值逐渐增大, 在14:00达到当日最大值1.38, 随后又不断降低。当日AOD昼夜分布也存在差异, 白天AOD平均值为0.783, 大于夜晚AOD平均值0.315。

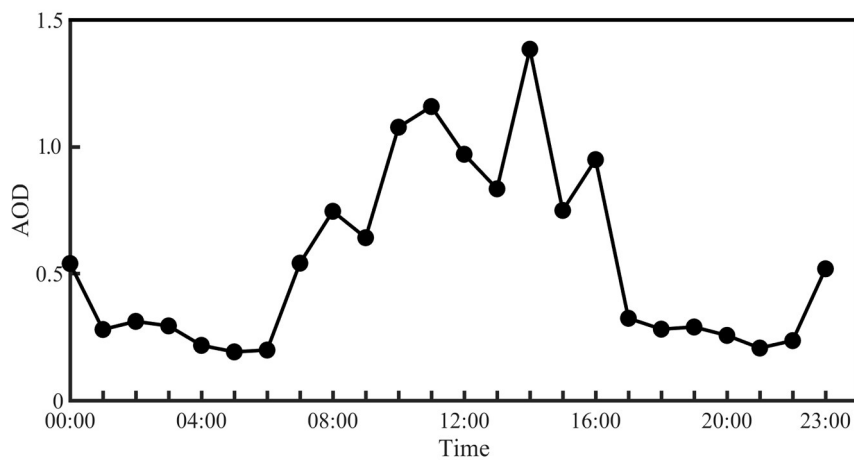


图5 AOD日变化

Fig. 5 Diurnal variation of AOD

2.5 气溶胶光学参数的月变化及影响因素分析

图6给出了2020年1月连续一个月的气溶胶标高和AOD的昼夜分布计算结果。从中可以看出, 1月白天和夜晚的气溶胶标高和AOD均存在差异, 都通过了显著水平为0.05的检验, 白天气溶胶标高和AOD明显大于夜晚。

进一步对于影响气溶胶标高和AOD的气象因素进行了分析。图7表示了2020年1月的气溶胶标高和相对湿度之间的相关性, 其中相对湿度数据为逐日平均值, 来源于安徽省气象观测站(58321), 由图可知, 相

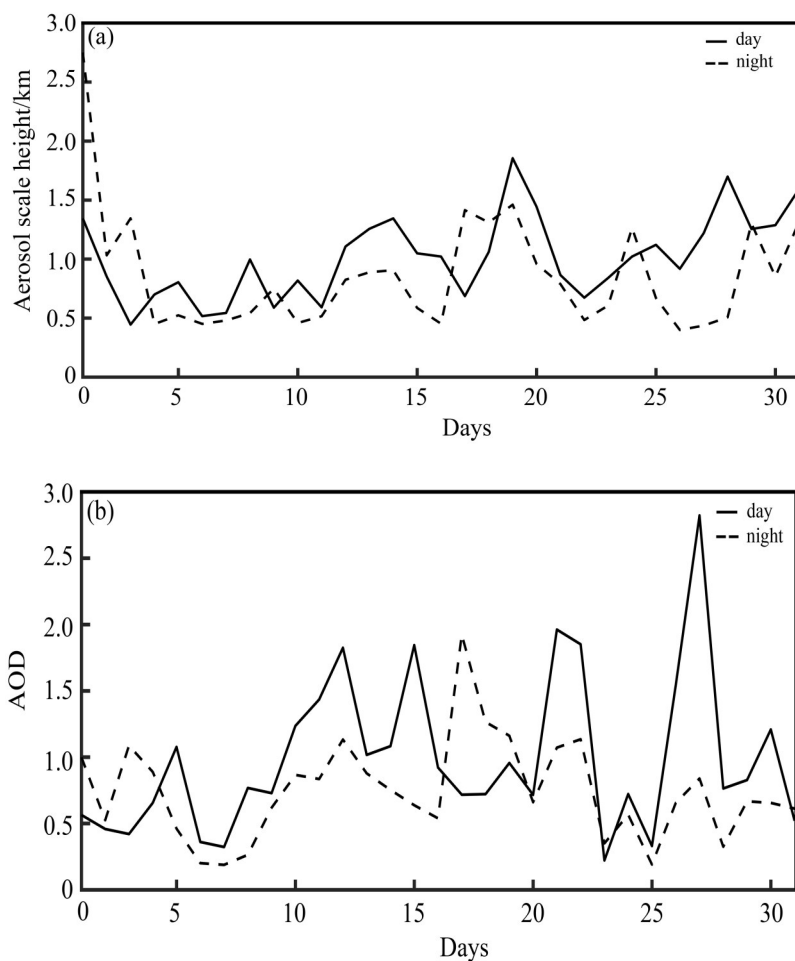


图 6 2020 年 1 月气溶胶标高 (a) 和 AOD (b) 昼夜对比

Fig. 6 Day-night comparison of aerosol scale height (a) and AOD (b) in January 2020

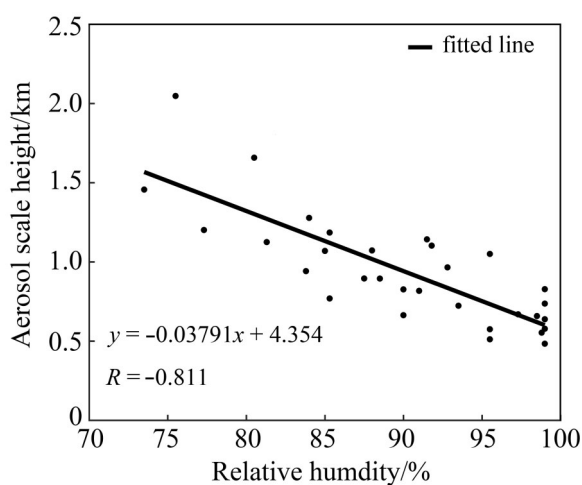


图 7 气溶胶标高和相对湿度的关系

Fig. 7 Relationship between aerosol scale height and relative humidity

对湿度和气溶胶标高呈现显著的负相关关系,通过了99%的显著性水平检验,即气溶胶标高随着相对湿度的减少而增大。造成这种现象的原因,可能是由于相对湿度的增加,气溶胶粒子对水汽的吸收能力增强,使气溶胶粒子本身的质量不断增大,受重力的影响出现沉降作用,导致气溶胶标高减小^[23]。1月气溶胶标高和相对湿度的相关系数为-0.881,证明两者之间存在明显的负相关。

此外,还对2020年1月AOD和能见度的关系进行分析,结果如图8所示。总体来看,1月昼间、夜间和总的AOD与能见度均呈现负相关关系。值得注意的是,1月白天AOD与能见度的相关性要强于夜晚,白天AOD与能见度的相关系数为-0.701,而夜间的相关数据为-0.612。

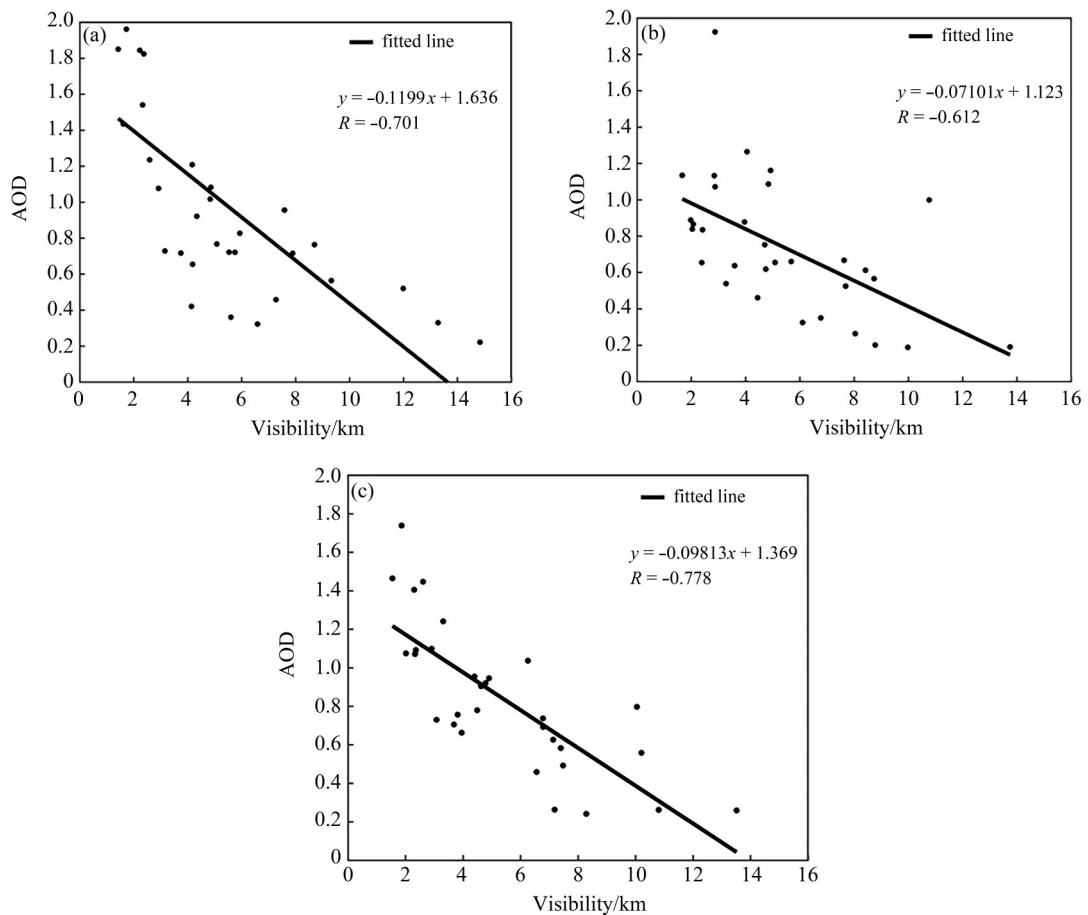


图8 AOD与能见度的关系。(a) 白天;(b) 夜晚;(c) 全天

Fig. 8 The relationship between AOD and visibility. (a) Day; (b) night; (c) all day

3 结论

利用MPL接收到的回波信号,通过Fernald法求解出气溶胶消光系数垂直廓线,计算得出气溶胶标高;同时利用能见度和消光系数的关系得到近地面水平方向的消光系数,由此计算出AOD。对合肥地区的2020年1月连续一个月的昼夜气溶胶标高以及AOD进行了计算分析,结果显示,两者昼夜均存在差异。进一步对影响的气象因素进行分析,得出气溶胶标高和相对湿度呈现负相关关系,相对湿度大则气溶胶标高值小,AOD和能见度也存在负相关关系。提出的方法可为连续获得整层大气AOD昼夜分布特征、以及气溶胶标高和AOD的季节性差异提供技术参考。

参考文献:

- [1] Mao J T, Zhang J H, Wang M H. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. *气象学报*, 2002, 60(5): 625-634.
- [2] Chen H B, Fan X H, Xia X G. Review of satellite remote sensing of atmospheric aerosols and its applications in climate and environment studies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(3): 621-633.
陈洪滨, 范学花, 夏祥鳌. 大气气溶胶的卫星遥感及其在气候和环境研究中的应用 [J]. *大气科学*, 2018, 42(3): 621-633.
- [3] Wang Z Z, Li J, Zhong Z Q, et al. LIDAR exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 96-100.
王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层 [J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 96-100.
- [4] Zhou B, Zhang L, Jiang D M, et al. Analysis of aerosol optical depth over Lanzhou based on lidar measurement [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(4): 666-671.
周碧, 张镭, 蒋德明, 等. 利用激光雷达观测资料研究兰州气溶胶光学厚度 [J]. *干旱气象*, 2013, 31(4): 666-671.
- [5] Penndorf R. The vertical distribution of Mie particles in the troposphere [J]. *Journal of Meteorology*, 1954, 11(3): 245-247.
- [6] Qiu J H, Zong X M, Zhang X Y. A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, 36(3): 361-371.
- [7] Fan W, Han Y, Wang Y, et al. Analysis on aerosol scale height measured at inland and coastal zone [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 532-535.
范伟, 韩永, 王毅, 等. 内陆和沿海地区大气气溶胶标高的测量分析 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 532-535.
- [8] Li C C, Mao J T, Liu Q H, et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(5): 869-880.
李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. *大气科学*, 2003, 27(5): 869-880.
- [9] Han Y, Fan W, Rao R Z, et al. Aerosol scale height of visible light-wave in experimentation study [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(4): 33-40.
韩永, 范伟, 饶瑞中, 等. 可见光波段气溶胶标高的实验研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(4): 33-40.
- [10] Hu S X, Wang Z Z, Xu Q S, et al. Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3): 307-310.
胡顺星, 王珍珠, 徐青山, 等. 激光雷达测量大气气溶胶光学厚度方法研究 [J]. *量子电子学报*, 2006, 23(3): 307-310.
- [11] Chen S S, Xu Q S, Xu C D, et al. Calculation of whole atmospheric aerosol optical depth based on micro-pulse lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 17-25.
陈莎莎, 徐青山, 徐赤东, 等. 基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 17-25.
- [12] Spinhirne J D. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 48-55.
- [13] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652.
- [14] Han Y, Rao R Z, Wang Y J. Multi-wavelength spectral aerosol scale height in inshore in contrast with that in inland [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(1): 33-37.
韩永, 饶瑞中, 王英俭. 沿海和内陆地区多波长光谱气溶胶标高的比较分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 33-37.
- [15] Kunz G J, de Leeuw G. Inversion of lidar signals with the slope method [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(18): 3249-3256.
- [16] Liu H T, Ge Z Q, Wang Z Z, et al. Extinction coefficient inversion of airborne lidar detecting in low-altitude by Fernald iterative backward integration method (FIBIM) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1837-1843.
刘厚通, 葛占旗, 王珍珠, 等. 利用 Fernald 迭代后向积分法反演低空探测机载激光雷达消光系数 [J]. *光学学报*, 2008, 28

- (10): 1837-1843.
- [17] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Two data inversion algorithms of aerosol horizontal distribution detected by MPL and error analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(7): 1774-1778.
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 微脉冲激光雷达水平探测气溶胶两种反演算法对比与误差分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1774-1778.
- [18] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* A new micro-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 224-228.
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 224-228.
- [19] Lu X Y, Li X B, Qin W B, *et al.* Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1697-1704.
鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1697-1704.
- [20] Nebuloni R. Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(18): 3795-3804.
- [21] Yuan S, Xin Y, Zhou J. Lidar observations of the lower atmosphere in Hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(3): 387-395.
袁松, 辛雨, 周军. 合肥市郊低层大气的激光雷达探测研究 [J]. 大气科学, 2005, 29(3): 387-395.
- [22] Zhou J, Yue G M, Qi F D, *et al.* Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 140-148.
周军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测 [J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 140-148.
- [23] Cheng H X, Wang W, Du W L, *et al.* Simulation of temporal and spatial variations and causes of aerosol scale height in Hebei Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(2): 190-197.
成贺玺, 王卫, 杜玮璐, 等. 河北省气溶胶标高时空变化及其成因 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(2): 190-197.