# 大气气溶胶多层结构的激光雷达探测

于思琪<sup>1,2</sup>,刘东<sup>2</sup>,徐继伟<sup>2</sup>,王珍珠<sup>2</sup>,吴德成<sup>2</sup>,王英俭<sup>1,2</sup>

(1.中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 合肥 230026; 2.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)

摘要:目的 探测大气气溶胶的垂直分布,表征气溶胶的垂直结构和各层气溶胶的性质。方法 使用金华站 点激光雷达观测数据进行个例分析,用梯度法对边界层进行反演,利用退偏振比、颜色比和光学厚度对大 气中不同高度的气溶胶层进行分析。结果 大气垂直结构会出现多层不同性质的气溶胶层,激光雷达可以准 确地探测气溶胶随时间变化的垂直结构特征。选取0点至8点进行分析表明,在1.5 km 高度上下出现两层 气溶胶层,上下两层气溶胶层呈现出不同的性质,且其性质会随时间变化而改变。结论 大气边界层以外气 溶胶分布较为复杂,利用激光雷达探测的气溶胶消光系数、退偏振比、颜色比和光学厚度等参数能够较好 地表征气溶胶的垂直结构和各层气溶胶的性质。 关键词:激光雷达;气溶胶层;垂直分布

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.006

 中图分类号: X831
 文献标识码: A

 文章编号: 1672-9242(2019)06-0030-05

## Aerosol Multi-layer Vertical Distribution Detected by Lidar

YU Si-qi<sup>1,2</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>, XU Ji-wei<sup>2</sup>, WANG Zhen-zhu<sup>2</sup>, WU De-cheng<sup>2</sup>, WANG Ying-jian<sup>1,2</sup>
 (1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei
 230026, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**ABSTRACT: Objective** To detect the atmospheric aerosol vertical distribution and characterize the vertical structure of aerosol and the properties of each aerosol layer. **Methods** Lidar data of Jinhua city was used to have case study. Planetary boundary layer (PBL) was inversed with the gradient method. The proprieties of aerosol layers at different height were analyzed based on parameters of volume depolarization ratio (VDR), attenuated color ratio (ACR) and aerosol optical depth (AOD). **Results** Multi-layer aerosol could appear in the vertical structure of atmosphere. Lidar can accurately detect the vertical structural characteristics of aerosols over time. Analysis on aerosol layers during 00:00 to 08:00 showed that there were two aerosol layers. One was lower than 1.5 km; and the other was higher than 1.5 km. Besides, the two layers showed diverse characteristics changing with time. **Conclusion** The aerosol layer outside the PBL shows complex character. The depolarization ratio, extinction and color ratio, optical thickness and other parameters detected through lidar could help to characterize the vertical structure of aerosol and the properties of each aerosol layer.

KEY WORDS: LIDAR; aerosol layer; vertical distribution

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2019-03-04

基金项目:中国科学院青年创新促进会(2017482);国家自然科学基金面上项目资助(41875033)

作者简介:于思琪(1992-),女,河北邢台人,博士研究生,主要研究方向为激光雷达大气探测。

通讯作者:刘东(1977—),男,安徽滁州人,博士,研究员,主要研究方向为激光雷达技术与应用。

大气是由各种固体或液体微粒均匀地分散在空 气中形成的一个庞大的分散体系,该体系中分散的各 种粒子称为大气气溶胶[1]。大气气溶胶可根据产生机 制分为自然源和人为源,按来源可以分为本地源和外 来源。随着我国社会经济的快速发展,大气气溶胶已 成为我国环境污染的重要因素之一,尤其是我国北方 地区的冬季。分布在大气中的气溶胶除了会对人们的 健康产生影响,还会对辐射强迫产生影响,进一步影 响着天气和气候<sup>[2]</sup>。大气气溶胶通过参与云的微物理 过程,对云的生命周期也产生巨大影响,同时大气气 溶胶的垂直分布也会改变大气的热力结构及其稳定 性<sup>[3-4]</sup>。获取大气气溶胶的垂直结构有助于分析气溶 胶的来源以及估算不同高度大气气溶胶对辐射强迫 产生的影响。全球气溶胶模型对气溶胶分布的预测、 对辐射影响的准确评估也需要更多的气溶胶垂直分 布信息。传统的探测手段如探空无法连续定点观测, 而太阳辐射计则无法获得大气气溶胶的垂直廓线。激 光雷达作为一种主动遥感手段,可以连续获得大气气 溶胶高时空分辨率的垂直分布情况。

国内外的研究人员利用各种探测手段对大气气 溶胶的分布情况进行了一些观测。Sarangi等<sup>[4]</sup>利用微 脉冲激光雷达、太阳光度计等观测手段对印度恒河平 原季风时期气溶胶的分布情况进行了分析。Jugder 等<sup>[5]</sup>利用米偏振激光雷达对蒙古利亚地区的沙尘、生 物质燃烧气溶胶和人为源气溶胶进行了探测。Liu 等<sup>[6]</sup>利用 CALIPOSO 对全球沙尘气溶胶分布及传输 情况进行了分析。李杨等<sup>[7]</sup>通过搭载气溶胶采样装置和 激光粒子计数器的无人机,分析了秋末冬初重雾霾天气 下北京地区大气气溶胶颗粒物的垂直变化特征。高伟 等<sup>[8]</sup>利用太阳光度计对上海地区城市气溶胶特征进行 了观测。与其他观测手段相比,激光雷达具有可昼夜连 续观测、获得大气气溶胶垂直分布廓线等优势。

气溶胶光学厚度的增大不仅会导致地球表面变 暗,边界层高度发生变化,也会导致对流层温度的变 化。辐射传输模型显示在不同高度的气溶胶具有不同 的加热速率,且会对季风时期的区域气候产生影 响<sup>[9]</sup>。有研究显示,有超过 50%的气溶胶会被抬升到 高海拔地区,粗颗粒物对漂浮层气溶胶层和气溶胶柱 浓度都有很大贡献<sup>[4]</sup>。因此对气溶胶的垂直分布及气 溶胶性质的研究具有重要意义。

# 1 仪器与测量

金华位于我国的东南部,属于长三角经济带。随着经济的快速发展,长三角地区成为全国雾霾较严重的区域之一。金华地区地形复杂,海拔差异较大,气溶胶成因复杂。为了获取金华地区大气气溶胶的垂直分布情况,在浙江师范大学(119.65N,29.14E)设立激光雷达观测站点(见图1),进行每天24h,一周7天的连续观测。观测时间从2013年5月至2014

年 6 月。在金华站点观测使用的激光雷达是双波长米 偏振拉曼激光雷达(Dual-wavelength Mie Polarization Raman Lidar,简写作 DMPRL)。图 2 给出了 DMPRL 系统的示意图。该激光雷达使用 Nd-YAG 激光器,有 532 nm 和 1064 nm 两个波长,接受通道有 4 个,分 别是 1064 nm 弹性散射通道、607 nm 拉曼散射通道 以及 532 nm 垂直、532 nm 平行两个偏振通道。表 1 给出了该雷达系统详细的系统参数。



图 1 观测地点的位置

表 1 DMPRL 系统参数

	项目	参数值
激光	波长	1064 nm/532 nm
	脉冲能量	100 mJ@1064 nm/100 mJ@532 nm
	脉冲频率	20 Hz
	光束发散角	<0.3 mrad
	线性偏振	>99% @532 nm
接收器	有效孔径	300 mm
	接收视场	<0.5 mrad
	滤波片带宽	0.3 nm@532 nm/0.3 nm@607 nm/0.5 nm@1064 nm
	光学传感器	PMT/APD
数据采集	采样率	20 MHz
	分辨率	16 bit



图 2 DMPRL 结构

修正过几何因子的激光雷达才能够精确获得近 距离的探测信号,通过实验的方法可以确定激光雷达 的几何因子。该方法假定大气是水平均匀的,在一定 距离,激光束在望远镜视场内完全重叠,即大气的后 向散射光完全进入探测系统<sup>[10]</sup>。

# 2 反演方法及结果

## 2.1 大气边界层

大气边界层位于对流层底部,其高度受到地球表 面的强烈影响。影响边界层发展的因素有很多,例如 局部热源和动力强迫,以及在天气尺度上的强迫。局 部强迫的变化 (例如表面温度)会导致大气边界层在 空间和时间上的变化。大气中的气溶胶主要在边界层 内部分布和扩散[11]。边界层高度和地面气溶胶浓度具 有明显的负相关,且较低的边界层不利于大气中气溶 胶的扩散<sup>[12-13]</sup>。激光雷达作为一种主动探测手段,通 过获得的气溶胶垂直廓线,以气溶胶为示踪物间接判 断大气边界层高度。目前已有的大气边界层激光雷达 反演方法有梯度法[14]、小波协方差变换法[15-16]、归一 化梯度法[17]等。梯度法是比较常用的大气边界层识别 方法, 表述为公式(2)。大气边界层响应地球表面强 迫的时间尺度通常约为1h或者更短<sup>[18]</sup>,降低高时间 分辨率激光雷达数据的时间分辨率,对大气边界层的 识别能产生更为良好的效果。

$$P(z) = P_0 \cdot K \cdot \frac{1}{z^2} \cdot (z) \cdot \exp\left\{-2\int_{z_0}^{z} (z) dz'\right\}$$
(1)

$$DEV(z) = \frac{d\left\lfloor P(z)z^2 \right\rfloor}{dz}$$
(2)

式中: *P*(*z*)为激光雷达接收高度 *z* 处大气的后向散射回波功率, W; *K* 为激光雷达系统常数, W·km<sup>3</sup>·sr。 *DEV*(*z*)廓线最小值对应的高度就是大气边界层的高度。

使用梯度法对 2013 年 8 月 3 日金华边界层 532 nm 波长激光雷达探测的通道距离校正信号 (RCS)进行反演,结果如图 3 所示。在 00:00 到 08:00 时间内,边界层处在 0.3 km 左右,并且随时间变化 不大。气溶胶主要集中在 0.3 km 以下,原因是夜间 稳定边界层的存在。在 08:00 到 12:00 左右,边界层 高度逐渐变高,从 0.3 km升高到 0.8 km左右。在 08:00 前后,日出导致到达地面的短波辐射增强,地面逆温 被破坏,边界层对流得到发展。在 12:00 到 20:00 左 右,边界层高度从 0.8 km 降低到 0.3 km 左右。在这 段时间,随着太阳辐射的减弱,地面长波辐射逐渐衰 弱,使得边界层高度变低。在 20:00 之后的夜间,气 溶胶垂直结构变得复杂,这主要是因为白天向上输送 的气溶胶仍旧存在残留层中。



## 2.2 性质分析

大气气溶胶的垂直分布不仅在大气边界层以内, 还会出现在边界层以上的悬浮气溶胶层。边界层内气 溶胶主要受地面影响,边界层外气溶胶可能来自于外 来源的传输。不同高度的气溶胶层可能呈现出不同的 性质。利用激光雷达探测的气溶胶消光系数、退偏振 比、颜色比和气溶胶光学厚度可以描述其性质。退偏 振比(volume depolarization ratio, VDR)可以反映 气溶胶的形状,沙尘与其他种类气溶胶的退偏振比不 同,可以作为一种有效手段识别沙尘<sup>[6]</sup>。颜色比 (attenuated color ratio, ACR)可以表征气溶胶粒子 相对大小。气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)表示的是气溶胶的消光能力,分别可以写作:

RCS@532 nm |

$$VDR = \frac{RCS @ 532 \text{ mm}}{RCS @ 532 \text{ mm}}$$
(3)

$$ACR = \frac{RCS @ 1064 \text{ nm}}{RCS @ 532 \text{ nm}}$$
(4)

$$AOD = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z) \mathrm{d}z \tag{5}$$

式中: *RCS*@1064 nm 表示 1064 nm 通道的距离 校正回波信号; *RCS*@532 nm 表示 532 nm 通道的距 离校正回波信号; *RCS*@532 nm  $\perp$ 和 *RCS*@532 nm 分 别表示 532 nm 的垂直和平行通道的距离校正信号;  $z_1 和 z_2 表示消光积分的高度上下限; \alpha 表示大气气溶$ 胶消光系数。

图 4 给出了 2013 年 10 月 13 日和 12 月 31 日激 光雷达的垂直观测结果,主要有 532 nm 距离校正信 号、颜色比和退偏振比。在这两天中,大气气溶胶均 出现分层现象,一部分气溶胶位于 1.5 km 以下,主 要集中于边界层内。位于 1.5 km 以上的气溶胶层则 位于对流层的自由大气层中。在图 4 中 2 km 处有一 层漂浮气溶胶,厚度在 1 km 左右,随着时间发展有 下降的趋势。近地面受到地面源的影响,一直存在气 溶胶层,且浓度持续相对较高。相比两层气溶胶,退 偏振比和颜色比都表现出较大差异。图 5 中,在 2~5 km 之间,也出现了明显的气溶胶层,退偏振比 和颜色比都区别于背景值。

对 2013 年 10 月 13 日和 12 月 31 日两天 00:00—08:00时间段中上下两层气溶胶层分别求退偏 振比和颜色比的平均值以及每层的光学厚度,图 5 给 出了反演结果。由光学厚度的分布情况可知,大气中 的气溶胶主要集中在边界层内。在图 5a 中,下层气 溶胶层的颜色比位于 0.3~0.4 之间,上层气溶胶层的 颜色比位于 0.2~0.3 之间,且都稳步变大,说明在这 天中不同高度气溶胶层中的气溶胶体积都随时间逐 步增长。下层气溶胶层的颜色比始终大于 0.3,而上 层气溶胶层的气溶胶黑始终小于 0.3,说明下层气溶 胶层中的气溶胶颗粒大小相对于上层较大。下层气溶 胶层的退偏振比逐渐从 0.03 下降到 0.02,而上层气



溶胶层的相对稳定,一直处于 0.02 附近。说明边界 层内气溶胶随着时间推移,形状发生了变化,边界层 外气溶胶形状变化不大。在0点至4点,下层气溶胶 的退偏振比大于上层气溶胶,而后两层气溶胶的退偏 振比相当,可能是由于地面的辐射冷却和地面源的排 放造成的。在图 5b 中,上下两层气溶胶的颜色比都 稳定在 0.3 附近, 上下层气溶胶颗粒大小相近。下层 气溶胶层的退偏振比为 0.06, 而上层气溶胶层的退偏 振比为 0.1, 说明两层气溶胶层中的气溶胶性质不同。 上层的气溶胶很可能是来自于高空传输的沙尘。文献 中对印度坎普尔的研究结果也显示,传输的粗颗粒物 会增加飘浮气溶胶层中的气溶胶<sup>[4]</sup>。Zhang 等<sup>[19]</sup>、Han 等<sup>[20]</sup>分别对金华区域以及南京区域的研究结果显示, 边界层内与边界层外气溶胶性质也会呈现出差异。高 空气溶胶传输过程很难被传统观测手段捕捉或连续 监测,而激光雷达能够很好地探测到垂直方向气溶胶 的传输和扩散过程。气溶胶在空中的存留时间主要受 到气象条件内在性质的影响,不同高度的气溶胶会产 生不同的加热速率,分析气溶胶层的垂直分布情况及 其性质,有助于减少气溶胶辐射强迫的不确定性<sup>[4]</sup>。

# 3 结语

激光雷达能够很好地反应大气中气溶胶的分布 情况,是大气垂直探测的有效手段。大气中气溶胶在 垂直方向上可能会存在分层的情况,边界层内是大气 气溶胶的集中区域,因此对大气边界层的反演是很有 必要的。在利用激光雷达对大气边界层的反演过程 中,由于气溶胶与云相互作用,边界层变化情况比较 复杂,自动反演仍需要更好的方法。大气中气溶胶可 以通过退偏振比、颜色比等参数来进行描述与区分, 其高度分布特征和性质都是重要的大气参数。对大气 中气溶胶的大小,形状等信息的反演将有利于对气溶 胶的来源、传输及演化情况进行分析。

#### 参考文献:

- [1] 戴树桂.环境化学[M]. 第 2 版.北京:高等教育出版 社,2006.
- [2] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效 应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.
- [3] SATHEESH S K, MOORTHY K, BABU S S, et al. Climate Implications of Large Warming by Elevated Aerosol over India[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (19): 116-122.
- [4] SARANGI C, TRIPATHI S N, MISHRA A K, et al. Elevated Aerosol Layers and Their Radiative Impact over Kanpur during Monsoon Onset Period: Radiative Impact of Eals[J]. Journal of Geophysical Research, 2016. 121 (13): 7936-7957.
- [5] JUGDER D, SUGIMOTO N, SHINODA M, et al. Dust,

Biomass Burning Smoke, and Anthropogenic Aerosol Detected by Polarization-sensitive Mie Lidar Measurements in Mongolia[J]. Atmospheric Environment, 2012, 54: 231-241.

- [6] LIU D, WANG Z, LIU Z Y, et al. A Height Resolved Global View of Dust Aerosols from the First Year CALI-PSO Lidar Measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D16): 214-228.
- [7] 李杨,马舒庆,贾小芳,等.基于无人直升机探测的北京地区重雾霾天气大气颗粒物垂直变化特征分析[J]. 气象与环境学报,2016,32(6):179-183.
- [8] 高伟,贺千山,潘亮,等.利用太阳光度计观测研究 上海地区城市气溶胶特征[C]//第六届长三角科技论 坛——长三角气象科技论坛.江苏:江苏省气象学会, 2009.
- [9] PANDITHURAI G, DIPU S, DANI K K, et al. Aerosol Radiative Forcing during Dust Events over New Delhi, India[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D13).
- [10] Wang Z Z, LIU D, WANG, Y J, et al. Development of Dual-wavelength Mie Polarization Raman Lidar for Aerosol and Cloud Vertical Structure Probing[C]// Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2014.
- [11] KORHONEN K, GIANNAKAKI E, MIELONEN T, et al. Atmospheric Boundary Layer top Height in South Africa: Measurements with Lidar and Radiosonde Compared to Three Atmospheric Models[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 14(8): 4263-4278.
- [12] QU Y, HAN Y, WU Y H, et al. Study of PBLH and Its

Correlation with Particulate Matter from One-year Observation over Nanjing, Southeast China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 668.

- [13] 谭敏,谢晨波,王邦新,等.北京2014年冬季边界层高度与颗粒物浓度的相关性研究[J].红外与激光工程, 2018,47(7):187-194.
- [14] 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.
- [15] BROOKS I M. Finding Boundary Layer Top: Application of a Wavelet Covariance Transform to Lidar Backscatter Profiles[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(8): 1092-1105.
- [16] BAARS H, ANSMANN A, ENGELMANN R, et al. Continuous Monitoring of the Boundary-layer Top with Lidar[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008. 8(23): p. 7281-7296.
- [17] 贺千山,毛节泰.北京城市大气混合层与气溶胶垂直 分布观测研究[J]. 气象学报,200,63(3):374-384.
- [18] STULL R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology[J]. Atmospheric Sciences Library, 1988, 8(8): 89.
- [19] ZHANG W, AUGUSTIN M, ZHANG Y, et al. Spatial and Temporal Variability of Aerosol Vertical Distribution Based on Lidar Observations: A Haze Case Study over Jinhua Basin[J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 1-8.
- [20] HAN Y, WU Y H, WANG T J, et al. Impacts of Elevated-aerosol-layer and Aerosol Type on the Correlation of AOD and Particulate Matter with Ground-based and Satellite Measurements in Nanjing, Southeast China[J]. Sci Total Environ, 2015, 532: 195-207.