

## 星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布

杨昊<sup>1,2,3</sup>, 谢晨波<sup>1,3\*</sup>, 方志远<sup>1,2,3</sup>, 王邦新<sup>1,3</sup>, 邢昆明<sup>1,3</sup>, 曹也<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>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, 安徽 合肥 230031;<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;<sup>3</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 通过匹配星载 CALIOP 过境合肥时间, 筛选 Aerosol-lidar 的观测数据, 选取 4 个典型天气个例[沙尘天气、多云天气、中度污染(无云)、中度污染(有云)], 对合肥地区的气溶胶进行联合观测, 并对气溶胶的类型、气溶胶的变化、气溶胶污染的成因及来源进行分析。结果表明, 多云天气下, 星载激光雷达对底层气溶胶探测时会受到天气的影响, 而地基激光雷达的探测效果较佳, 可以通过定点连续观测距离的校正信号准确地反映气溶胶含量和变化特点。星-地激光雷达的联合观测可以更好地分析多种复杂天气的气溶胶变化。联合观测结果表明: 轻度污染的沙尘型和受污染的浮尘型气溶胶主要集中在 0.8~1.6 km 高度范围内, 退偏振比集中在 0.18~0.20 之间; 多云天气的气溶胶主要为污染大陆型, 集中在 0.4~1.2 km 高度范围内, 其退偏振比在 0.015~0.020 之间, 气溶胶含量很少且为具有球形粒子属性的细颗粒物; 中度污染(无云)天气的气溶胶同时包含污染浮尘型和污染大陆型, 主要集中在 0.3~1.3 km 高度范围内, 退偏振比在 0.08 以下, 具有明显的球形粒子属性; 中度污染(有云)天气的气溶胶也同时包含污染浮尘型和污染大陆型, 主要集中在 0.8~1.4 km 高度范围内, 退偏振比在 0.075~0.100 范围内, 为粒径较小的球形粒子。

**关键词** 遥感; 星-地联合激光雷达; 气溶胶变化; 垂直分布; 退偏振比

**中图分类号** X831

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.0110001

## 1 引言

气溶胶由悬浮在大气中的固体(沙尘、浮尘)或液体(水滴、雾等)微粒组成, 气溶胶的直接效应和间接效应影响着天气与气候的变化<sup>[1-3]</sup>。由于生物有机体(例如病毒、病菌)容易借助气溶胶扩散传播, 以及气溶胶具有消光作用, 气溶胶污染已经严重影响人体健康和人们出行<sup>[4-5]</sup>。另外, 伴随中国经济的快速发展, 工业废气、汽车尾气密集排放等造成我国许多地区人为气溶胶增加<sup>[6-8]</sup>。在人口密集的城市, 特别是特大型城市群, 气溶胶污染的影响日益显著<sup>[9-12]</sup>。因此有必要对气溶胶进行遥感监测, 激光雷达因其具有很高的分辨率和探测精度, 被广泛使用<sup>[13]</sup>。激光雷达利用激光在大气中传输时与大气

中介质相互作用获得的回波信号, 可以有效获得气溶胶随时空的垂直分布特征<sup>[13-15]</sup>。

目前对气溶胶进行观测的常用工具有星载激光雷达和地基激光雷达。星载激光雷达由于观测范围大, 可以遥感观测不同地区的气溶胶垂直分布<sup>[16-17]</sup>。CALIPSO 卫星携带的载荷 CALIOP 激光雷达, 由于分辨率较高, 且可以实现全球范围内的云和气溶胶的常年监测, 常被人们使用<sup>[16-18]</sup>。而地基激光雷达可以长期定点观测, 探测精度高, 可以用于某一地区气溶胶垂直分布的常年遥感监测<sup>[19]</sup>。因此, 星-地激光雷达联合观测可以更真实地反映气溶胶的时空变化特点。

合肥作为长三角特大型城市群西部重要经济发展的桥头堡, 近年来污染不断加剧, 引起了广大科学家们的关注, 而激光雷达作为气溶胶污染遥感观测

**收稿日期:** 2020-06-24; **修回日期:** 2020-07-24; **录用日期:** 2020-08-13

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(XDA17040524)、中科院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目(KP-2019-05)

\***E-mail:** cbxie@aiofm.ac.cn

的有效手段发挥了重要作用,特别是合肥西郊的地基激光雷达在长三角西部地区的空气污染遥感观测过程中发挥了重要作用<sup>[20-23]</sup>。本文利用星-地激光雷达联合观测的合肥西郊的地基激光雷达数据,分析了多种天气下激光雷达对气溶胶的探测效果的影响,通过激光雷达的弹性散射回波信号准确地反映气溶胶含量和变化特点,从而有助于更好地了解气溶胶对合肥地区大气环境、气候变化的影响。

## 2 数据来源和测量方法

### 2.1 数据来源

地基激光雷达数据使用了中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的气溶胶-水汽探测激光雷达(以下论文中简称 Aerosol-lidar)观测数据,图 1 给出 Aerosol-lidar 系统的光学原理图。

本研究将 Aerosol-lidar 安放于合肥市西郊(31.90°N,117.16°E)进行联合观测。Aerosol-lidar 采用 3 个波长(1064 nm、532 nm 和 355 nm)和 6 个采集通道进行观测和采集,其垂直分辨率为 7.5 m,可以对观测点上空进行 24 h 的连续垂直观测,具体参数见表 1。

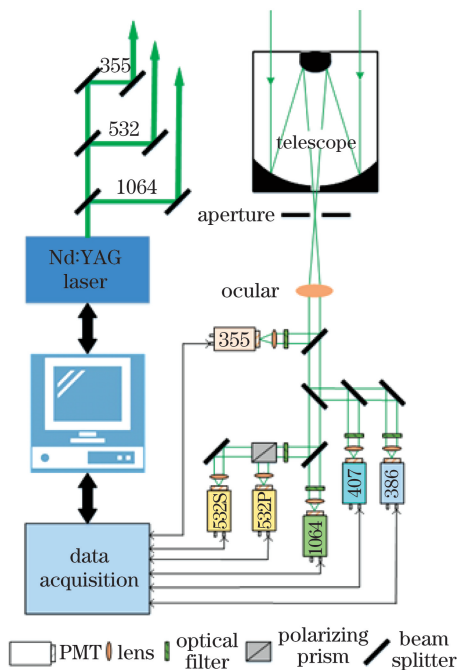


图 1 Aerosol-lidar 系统光学原理图

Fig. 1 Schematic of the Aerosol-lidar system

星载 CALIOP 探测的气溶胶和云的数据,采用分层分类。本文使用了 CALIOP 的 Level1B 分类产品中的 532 nm 后向散射系数剖面数据、Level2 的 5 km 气溶胶廓线产品和 Level2 的气溶胶垂直分

类特征数据(见表 1)。在研究气溶胶退偏振比廓线时,提取靠近地基激光雷达观测点附近的 CALIOP 廓线数据,对 CALIOP 廓线数据作平均处理,滤除异常信号值后,和地基廓线进行比较分析。地基激光雷达的廓线数据则选取卫星经过的 1 h 内的平均值。

表 1 气溶胶探测激光雷达和 CALIOP 的主要技术参数

Table 1 Main parameters of CALIOP and Aerosol-lidar

Technical parameter	CALIOP value	Aerosol-lidar value
Wavelength /nm	532/1064	355/532/1064
Single pulse energy /mJ	110	30
Repetition frequency /Hz	20.25	20
Telescope diameter /mm	1000	200
Vertical resolution /m	30-60	7.5
Horizontal resolution /m	333	—

为了更好地说明气溶胶的变化、垂直分布及成因,需通过结合近地面 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 颗粒物浓度数据(数据采用安徽省生态环境厅提供的激光雷达观测点对应的董铺水库站点的数据 <http://sthjt.ah.gov.cn/site/tpl/5391?cityCode=340100>),以及向当地气象部门了解的近地面风速  $v$ 、风向  $\theta$  的情况作联合分析。为了判断气溶胶污染物的轨迹和来源,利用 NOAA (<https://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajsrc.pl>)提供的 HYSPLIT 模型对气溶胶的后向轨迹进行分析。

### 2.2 测量方法

激光雷达测量大气气溶胶,用后向散射系数、消光系数来表征气溶胶特性,激光雷达的弹性散射回波信号方程可写为<sup>[13,19,24]</sup>

$$P(z) = \frac{C [\beta_m(z) + \beta_a(z)] \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha_m(z') + \alpha_a(z')] dz'\right\}}{z^2}, \quad (1)$$

式中: $P(z)$ 为距离  $z$  处的大气后向散射信号,单位为  $W$ ,用  $P(z) \cdot z^2$  表示激光雷达的距离平方修正信号,单位为  $W \cdot km^2$ ;  $C$  为设备常数,单位为  $W \cdot km^3 \cdot sr$ ;  $\alpha(z)$ 为距离  $z$  处的大气消光系数,单位为  $km^{-1}$ ;  $\beta(z)$ 为距离  $z$  处的大气后向散射系数,单位为  $km^{-1} \cdot sr^{-1}$ ;下标  $m$  和  $a$  分别表示空气分子和气溶胶粒子。激光雷达以大气中的气溶胶粒子作为探测目标,气溶胶外部与自由大气交界处,气溶胶粒子流动性大,气溶胶浓度下降非常快,即表现为接收到的距离校正信号廓线快速变化,回波信号的大小与气溶胶的浓度高低呈正比,因此采用距离平方校正信

号观测气溶胶变化的准确率较高<sup>[19,25]</sup>。

通过大量实际观测可得  $\alpha(z)$  和  $\beta(z)$  满足

$$\alpha_a(z) = S_1 \beta_a(z)^k, \quad (2)$$

式中:  $S_1$  为一个经验常数, 取 60;  $k$  为一个常数, 典型值取 1。

气溶胶粒子存在偏振和退偏振特性, 先前的研究指出对于多分散系的沙尘气溶胶粒子, 如果非球形特征越明显, 则线退偏振比越大<sup>[26]</sup>。利用 532 nm 波长的偏振光研究气溶胶粒子的偏振和退偏振特性, 当激光在大气中传输时, 激光雷达探测的退偏振比可表示为<sup>[27-28]</sup>

$$\delta(z) = k \frac{P_s(z)}{P_p(z)}, \quad (3)$$

式中  $\delta(z)$  为激光雷达探测的退偏振比,  $k$  为增益常

数比,  $P_s(z)$  和  $P_p(z)$  分别表示大气后向散射回波功率在高度  $z$  处的垂直分量和平行分量。

### 3 星-地激光雷达联合观测分析

#### 3.1 天气状况概述

基于近两年 Aerosol-lidar 观测的数据, 匹配 CALIPSO 卫星过境合肥的时间地点, 选取典型的 4 个天气个例进行观测分析。4 个天气个例分别是 2018 年 4 月 17 日的沙尘天气(轻度污染)、2018 年 7 月 17 日的多云天气(空气质量优)、2018 年 12 月 13 日中度污染(无云)、2019 年 1 月 25 日中度污染(多云)。图 2 为利用 MODIS 对合肥地区进行遥感获得的真彩图, 图 3 为不同天气下对应的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度数据。

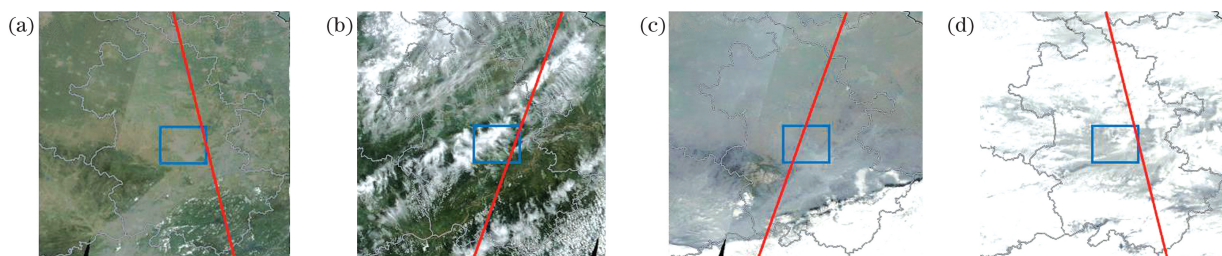


图 2 典型天气个例的 MODIS 遥感真彩图 [蓝色框为所测的合肥地区范围 (30°57'N~32°32'N, 116°41'E~117°58'E), 直线为 CALIPSO 卫星过境轨迹]。(a) 2018 年 4 月 17 日; (b) 2018 年 7 月 17 日; (c) 2018 年 12 月 13 日; (d) 2019 年 1 月 25 日  
Fig. 2 MODIS remote sensing true color map of a typical weather cases [The blue frame is the area of Hefei (30°57'N to 32°32'N, 116°41'E to 117°58'E), and the line is CALIPSO Satellite transit trajectory]. (a) April 17, 2018; (b) July 17, 2018; (c) December 13, 2018; (d) January 25, 2019

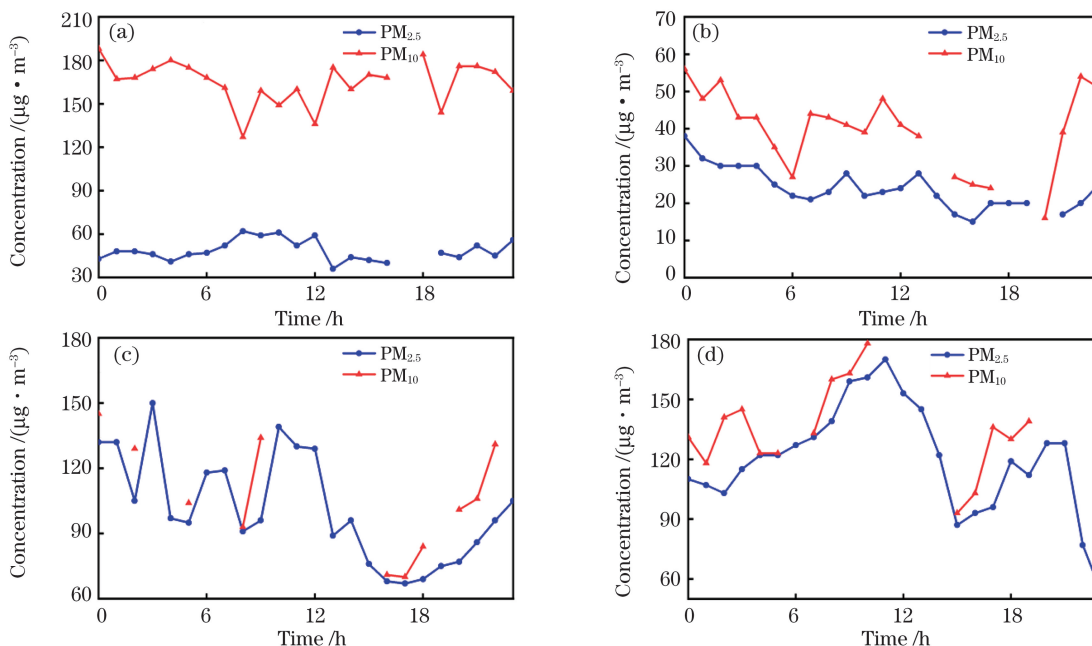


图 3 典型天气个例的颗粒物浓度逐时间序列图(部分时段  $PM_{10}$  数据缺失)。(a) 2018 年 4 月 17 日; (b) 2018 年 7 月 17 日; (c) 2018 年 12 月 13 日; (d) 2019 年 1 月 25 日

Fig. 3 Time-series graphs of particulate matter concentration in typical weather cases ( $PM_{10}$  data is missing in some periods). (a) April 17, 2018; (b) July 17, 2018; (c) December 13, 2018; (d) January 25, 2019

结合图 2 和图 3 对典型的 4 个天气个例的天气状况进行说明。从图 2(a)中可以看出,2018 年 4 月 17 日为轻度雾霾天气,而从图 3(a)中可以看出,当天  $PM_{2.5}$  质量浓度总体低于  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{10}$  质量浓度总体高于  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,由于当天  $PM_{10}$  质量浓度远高于  $PM_{2.5}$  质量浓度,故可以认为当天天气是由沙尘(浮尘)引起的气溶胶所污染。从图 2(b)中可以看出,2018 年 7 月 17 日当天合肥观测点上空为多云天气,而从图 3(b)中可以看出,当天  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度均低于  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,这说明当天观测点附近气溶胶含量较少,空气质量优。从图 2(c)中可以看出,2018 年 12 月 13 日当天合肥观测点上空为雾霾天气,从图 3(c)中可知当天空气主要污染物为  $PM_{2.5}$  颗粒,峰值质量浓度为  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,达到中度污染天气等级,午后  $PM_{2.5}$  质量浓度先下降后上升,且在 00:00—12:00 期间的  $PM_{2.5}$  质量浓度平均值高于其他时段。从图 2(d)中可以看出,2019 年 1 月 25 日当天合肥为多云天气,结合

图 3(d)可知当天空气主要污染物为  $PM_{2.5}$  颗粒,午间质量浓度达到峰值,为  $161 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,达到中度污染天气等级,且白天的  $PM_{2.5}$  质量浓度值总体高于夜间的值,午后  $PM_{2.5}$  质量浓度先下降后上升,之后又下降,这可能是传输扩散所致。

### 3.2 联合观测与分析

通过以上颗粒物浓度数据可以较好地说明主要污染物的类型、污染物浓度随时间的变化情况,而通过激光雷达可以直观地看出气溶胶的垂直分布、气溶胶的变化情况。图 4 为 Aerosol-lidar 对典型天气个例观测提取的距离校正信号剖面图,地基激光雷达定点对典型个例天气进行 24 h 连续观测。由于观测中发现 2018 年 7 月 17 日在 10~14 km 范围内出现了高云,因此观测高度统一保留 14 km。风场是影响气溶胶变化的最直接因素之一,因此在研究气溶胶变化的时候需结合风速、风向来说明。图 5 为典型天气个例对应的风速、风向逐时间序列图。

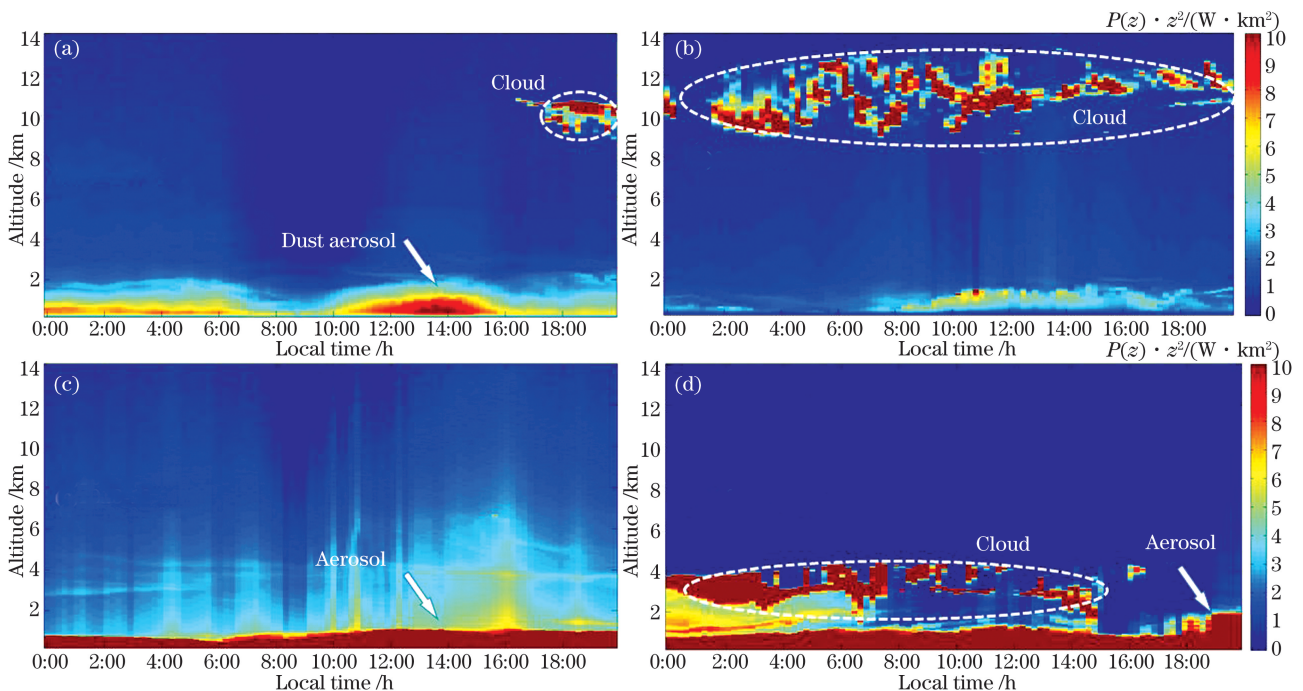


图 4 Aerosol-lidar 对典型天气个例观测的距离校正信号垂直剖面图:(a)2018 年 4 月 17 日;(b)2018 年 7 月 17 日;  
(c)2018 年 12 月 13 日;(d)2019 年 1 月 25 日

Fig. 4 Vertical profile of the range corrected signal of Aerosol-lidar in typical weather cases: (a) April 17, 2018;  
(b) July 17, 2018; (c) December 13, 2018; (d) January 25, 2019

结合图 4 和图 5 对 4 个典型个例天气的气溶胶垂直分布、气溶胶变化进行说明。从图 4(a)中可以看出,2018 年 4 月 17 日当天 18:00 以后,在观测点上空 10 km 高度处有一层高云,而气溶胶层主要分布在 1.6 km 以下,为连续的整层气溶胶层,但气溶

胶层浓度不高,其距离校正信号的值为  $4 \sim 10 \text{ W} \cdot \text{km}^2$ ,当天风速较大,平均风速为  $7.6 \text{ m}/\text{h}$ ,这说明空气流动性较好,便于沙尘气溶胶的传输、扩散。由图 4(b)中可以看出,2018 年 7 月 17 日在观测点上空 10~14 km 范围内出现了高云,其距离校

正信号的值为  $10 \text{ W} \cdot \text{km}^2$ , 当天的气溶胶层不连续。只在 08:00—16:00 时间段内, 其值为  $4 \sim 6 \text{ W} \cdot \text{km}^2$ , 当天的平均风速为  $7.1 \text{ m/h}$ , 主要为东南风气流, 是从东南沿海吹来的气流, 较为洁净, 气溶胶浓度较低; 在 08:00—16:00 时间段内风向发生了变化, 偏南风、西南风较多, 这可能因为白天人为活动增加导致气溶胶浓度上升, 而偏偏南风、西南风将少量的气溶胶传输至本地所致。由图 4(c) 可知, 2018 年 12 月 13 日当天, 在观测点上空无云,  $1.6 \text{ km}$  以下有连续的气溶胶层, 气溶胶层浓度较高, 其值在  $10 \text{ W} \cdot \text{km}^2$  以上, 当天平均风速为  $3.2 \text{ m/h}$ , 大气层结较为稳定。在 00:00—12:00 期间, 平均风速为  $1.6 \text{ m/h}$ , 属于小风静稳条件, 该时

段气溶胶层的高度低于其他时段的气溶胶层高度, 说明在 00:00—12:00 期间气溶胶在本地累积, 气溶胶边界层高度下降, 气溶胶浓度上升。由图 4(d) 可知, 2019 年 1 月 25 日当天, 在观测点上空  $3.8 \sim 4.0 \text{ km}$  范围内出现了云层, 其值在  $10 \text{ W} \cdot \text{km}^2$  以上, 而在  $1.4 \text{ km}$  以下有连续的气溶胶层, 气溶胶层浓度较高, 其值在  $10 \text{ W} \cdot \text{km}^2$  以上, 00:00—14:00 期间, 气溶胶层外部和云层紧密相连, 说明云、气溶胶发生了剧烈混合。当天有持续的东北风, 平均风速为  $8.4 \text{ m/h}$ , 空气流动性较好, 不利于气溶胶在本地累积。气溶胶层在 18:00 以后高度迅速上升至  $2 \text{ km}$ , 说明夜间发生了气溶胶扩散传输, 因此浓度也会降低。

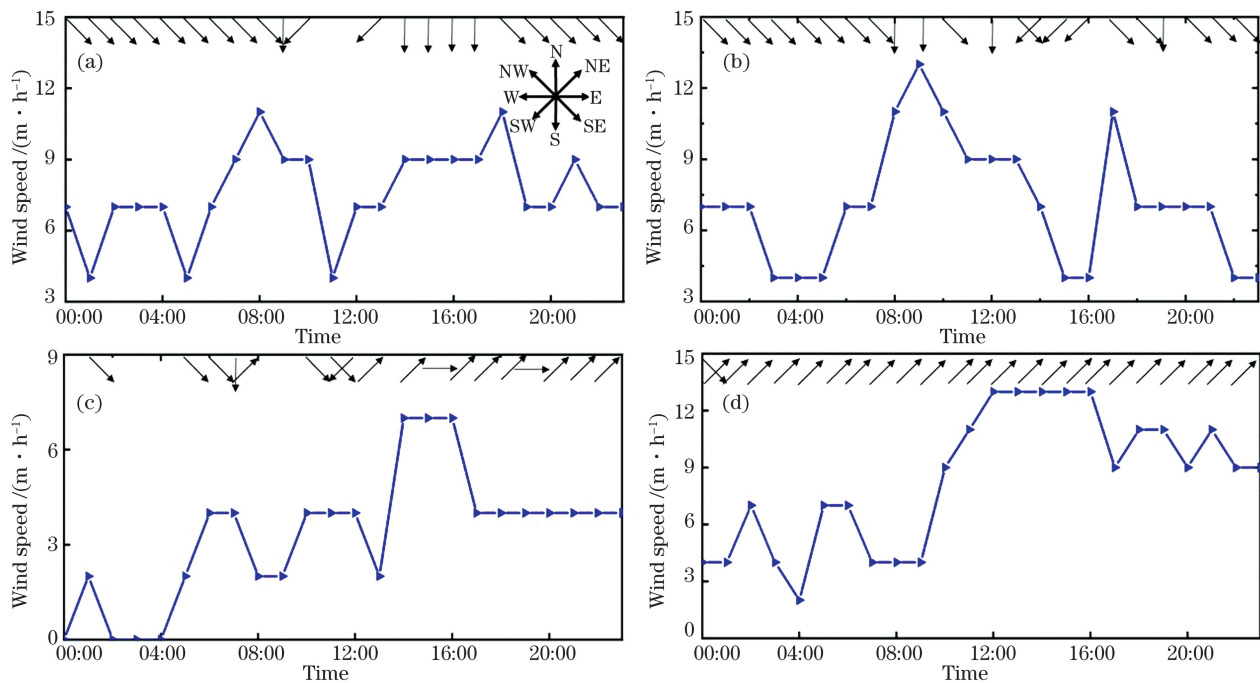


图 5 典型天气个例近地面风速风向(部分时段风向变化较快、或者风速为 0 时, 风向未给出)。(a)2018 年 4 月 17 日; (b)2018 年 7 月 17 日; (c)2018 年 12 月 13 日; (d)2019 年 1 月 25 日

Fig. 5 Examples of wind speed and direction for typical weather near the ground, in which the wind direction is not given when the wind direction changes rapidly during certain periods, or the wind speed is 0. (a) April 17, 2018; (b) July 17, 2018; (c) December 13, 2018; (d) January 25, 2019

图 6 为星载 CALIOP 过境合肥期间, 扫描的后向散射系数垂直剖面图。从图 6(a) 可以看出, 卫星当天经过安徽省境内, 整个卫星扫描的地区上空无云层, 在  $2 \text{ km}$  以下高度有一层连续的气溶胶层, 其后向散射系数在  $3.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  以上, 说明该层气溶胶浓度较高。如果探测区域有云层且云层较厚, 则激光在大气传输的时候由于消光作用, 激光的能量迅速衰减, 因此多云天气对星载激光雷达观测底层气溶胶的影响会很大。从图 6(b) 中可知, 卫

星当天经过安徽省境内, 且扫描的地区上空  $10 \sim 14 \text{ km}$  范围内出现了高云, 后向散射系数在  $7.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  以上, 这说明云层厚度较厚, 对激光的衰减作用很大, 在地表附近的气溶胶层不易被探测到。从图 6(c) 中可知, 卫星经过省内东北部地区到合肥地区时, 在  $1.4 \text{ km}$  以下高空有一层连续的气溶胶层, 且气溶胶浓度较高, 后向散射系数在  $4.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  以上, 而卫星经过省内西南部地区时, 由于  $3.8 \text{ km}$  高空连续云层的消光作用,

雷达无法探测出云层以下气溶胶层的分布,云层的后向散射系数在  $8.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  以上。从图 6(d)中可知,卫星经过安徽省境内,在 4 km 高度有不连续的云层,云层的后向散射系数在  $8.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  以上,卫星经过合肥地区时可以发现在 2 km 高度有一层气溶胶,气溶胶层的后向散射系数在  $4.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  以上,气溶胶浓度较高。卫星经过省内其他地区时,由于云层的消光作用,大部分地区的气溶胶分布情况无法被探测。

由于星-地激光雷达探测的视角、距离、分辨率

等要素存在差异,探测结果存在一定的不确定度。地基激光雷达从地面向上探测,遇到云层后激光能量迅速衰减。对气溶胶的探测结果分辨率高、观测精度高,可以很好地捕捉上空气溶胶随时间序列的垂直分布。而星载激光雷达由于是从上往下探测,如果遇到云层,激光的能量会迅速衰减,从而对底层气溶胶探测不利,且卫星时刻移动,因此探测精度较低、分辨率不如地基激光雷达。但卫星扫描范围大,对气溶胶随时空的分布、成因可以提供较好的数据支撑。

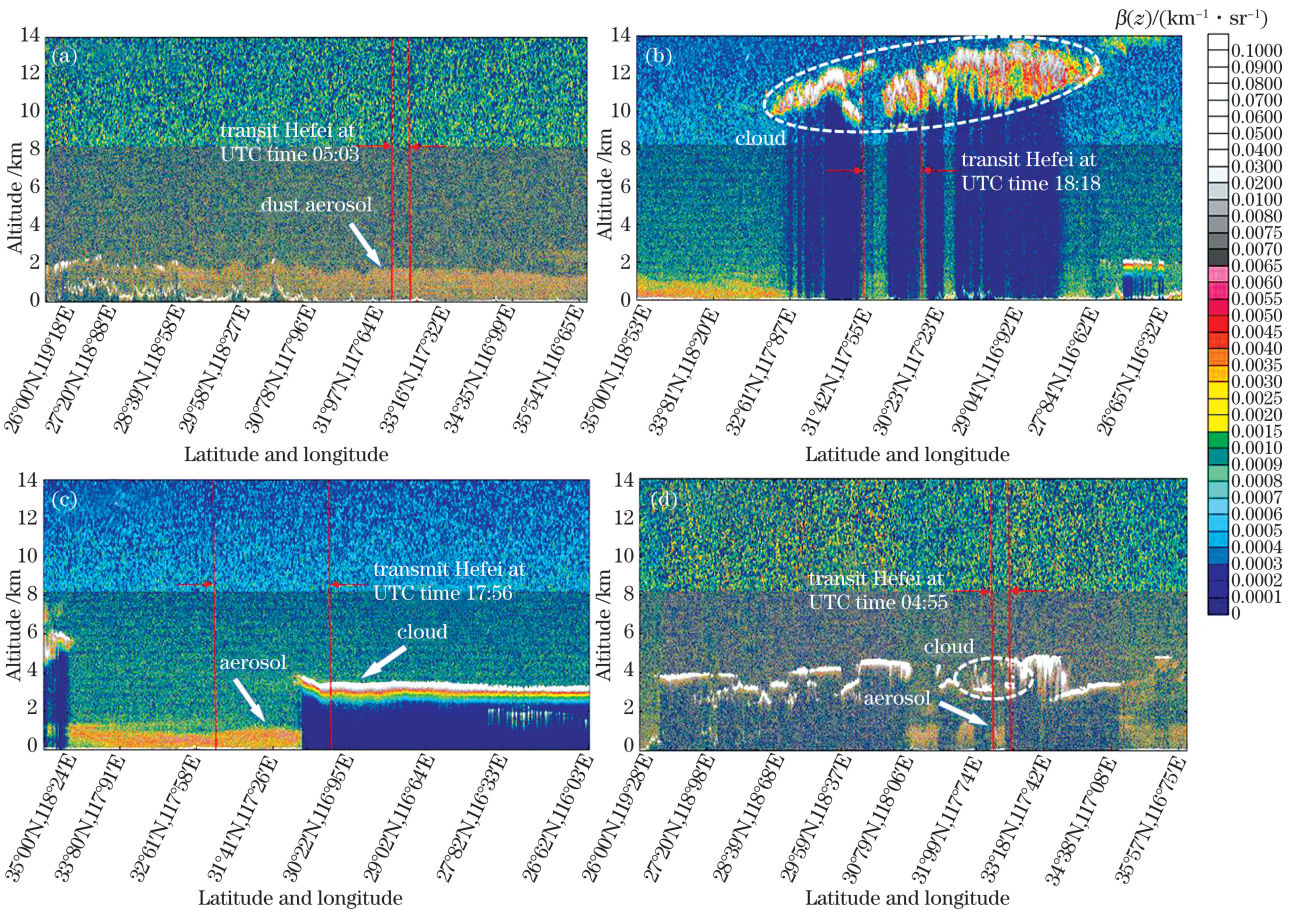


图 6 CALIOP 对典型天气个例观测的后向散射信号垂直剖面图。(a)2018 年 4 月 17 日; (b)2018 年 7 月 17 日; (c)2018 年 12 月 13 日; (d)2019 年 1 月 25 日

Fig. 6 Vertical profile of the backscattered signal observed by CALIOP on typical weather cases. (a) April 17, 2018; (b) July 17, 2018; (c) December 13, 2018; (d) January 25, 2019

综合以上分析可以得出,星-地激光雷达联合观测可以从时间、空间不同维度,更加准确地捕捉刻画气溶胶随时空的分布情况。从观测结果来看,地基激光雷达观测结果的精度更高,星载激光雷达分辨率较好,能看出气溶胶的空间变化情况。星地联合观测,可以更好地分析多种复杂天气的气溶胶变化,其结果和地面颗粒物浓度数据具有很高的一致性。

激光雷达的 532 nm 波长的激光有垂直和平行两个分量,当激光照射到大气中的气溶胶粒子时,其后向散射光的偏振特性可以用来表征气溶胶层的粒子特性、高度分布等。图 7 给出了 CALIOP 和 Aerosol-lidar 对典型天气个例观测的气溶胶粒子的退偏振比。由于气溶胶层主要分布在 2 km 高度以下,本研究统一保留 2 km 以下的退偏振比数据进

行分析。

从图 7(a)可以看出,2018 年 4 月 17 日当天 0.8~1.6 km 高度范围内气溶胶结构层粒子退偏振比的值较大,由地基 Aerosol-lidar 探测得到的数据平均值在 0.2 以上,而由 CALIOP 探测得到的平均值在 0.18~0.20 之间,这说明 0.8~1.6 km 高度范围内气溶胶层的非球形粒子的浓度较高,退偏振特性明显,即该层的大粒径沙尘(浮尘)浓度较高。从图 7(b)可知,2018 年 7 月 17 日当天在 0.4~1.2 km 处有一层稀薄的气溶胶层,其退偏振比在 0.015~0.020 之间,退偏振特性不明显,这说明该层气溶胶粒子为粒径较小的  $PM_{2.5}$  颗粒,气溶胶粒子球形属性明显。从图 7(c)可以看出,2018 年 12 月 13 日当天在 0.3~1.6 km 高度范围内气溶胶粒子退偏振比的值较小,均在 0.080 以下,这说明当

天的气溶胶粒子为粒径较小的  $PM_{2.5}$  颗粒,球形属性明显。CALIOP 和 Aerosol-lidar 对于在 1.4~1.6 km 高度范围内气溶胶层粒子退偏振比的探测结果存在差异,主要原因是在统计 Aerosol-lidar 退偏振比平均值时,在卫星经过的时间内该高度层的粒子退偏振比被统计的平均值偏大。从图 7(d)可以看出,2019 年 1 月 25 日当天在 0.8~1.4 km 高度范围内气溶胶粒子的退偏振比在 0.075~0.100 之间,这说明该层气溶胶层粒子浓度较高,但是主要为粒径较小的  $PM_{2.5}$  颗粒,气溶胶粒子球形属性明显。

由于星-地激光雷达在气溶胶观测数据的选择上存在时间、空间差异,因此探测结果会存在一定差异,但从以上结果来看,此次星-地激光雷达的退偏振比廓线变化趋势、高度信息基本一致,由此说明星-地激光雷达对气溶胶观测的一致性较好。

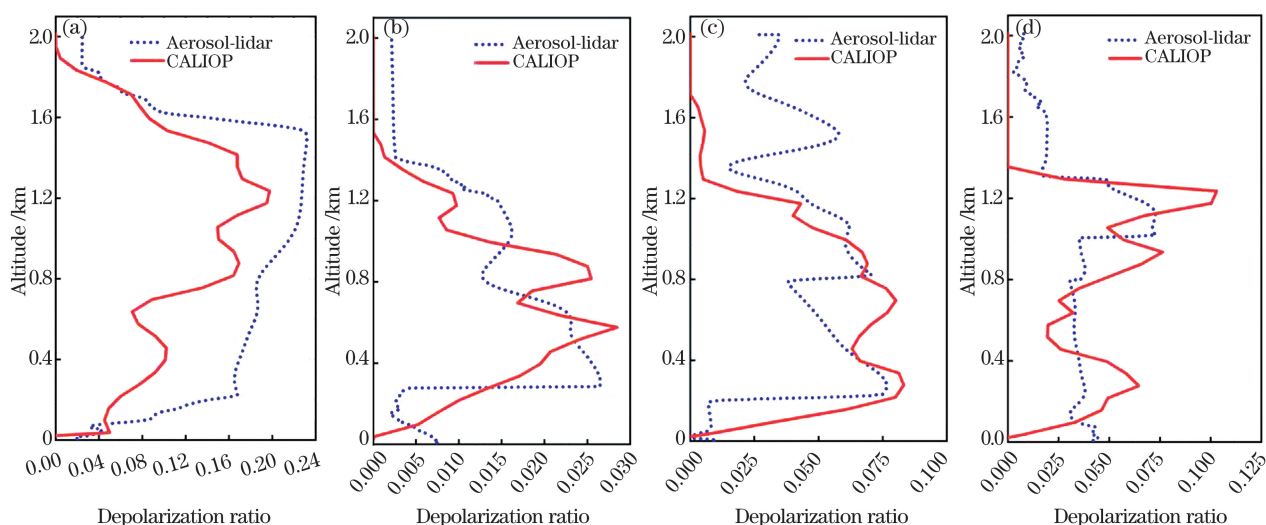


图 7 CALIOP 和 Aerosol-lidar 对典型天气个例观测的气溶胶粒子的退偏振比。(a)2018 年 4 月 17 日; (b)2018 年 7 月 17 日; (c)2018 年 12 月 13 日; (d)2019 年 1 月 25 日

Fig. 7 Depolarization ratio of aerosol particles observed by CALIOP and Aerosol-lidar for typical weather cases. (a) April 17, 2018; (b) July 17, 2018; (c) December 13, 2018; (d) January 25, 2019

### 3.3 气溶胶类型与后向轨迹分析

CALIOP 提供了气溶胶分类产品数据,将气溶胶层分为 8 个不同类型。通过 Level2 的 Vertical Feature Mask 产品数据获取此次典型天气个例的气溶胶分类垂直剖面图,如图 8 所示。NOAA 提供了 HYSPLIT 后向轨迹模式,可以用于分析气溶胶的来源和行进的轨迹,如图 9 所示为本文研究的 4 个典型个例天气的气溶胶 48 h 后向轨迹图。

结合图 8 和图 9,分析本文研究的 4 个典型个例天气的气溶胶类型、形成轨迹和形成来源。2018 年 4 月 17 日当天,合肥地区 2 km 以下高度主

要分布有沙尘型和污染浮尘型的气溶胶,且气溶胶分布连续;1.5 km 高度的气溶胶层粒子主要来自我国北方地区,由 2.5 km 的高度一路传输沉降至合肥本地,由于长距离传输,在各种气象条件作用下(如大气动力、压力等),传输至合肥地区的气溶胶层粒子与合肥周边地区的 1 km 高度以下的本地污染浮尘剧烈混合、沉降,形成当天的沙尘(轻度污染)天气。2018 年 7 月 17 日当天,气溶胶污染类型主要为污染大陆型,表明合肥当地地表附近有一层浓度较低的气溶胶,通过后向轨迹发现,吹来的空气为我国东南海域的洁净空气,因此该气溶胶层应由白天

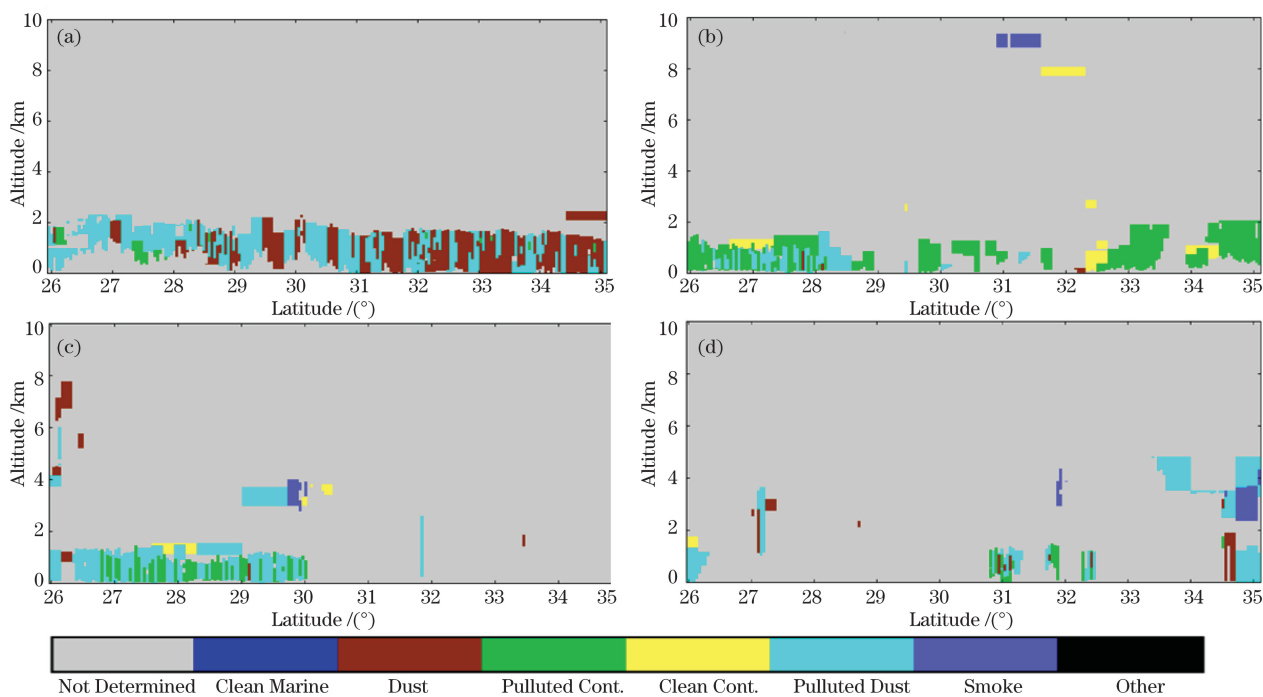


图 8 基于 CALIOP 探测得到的典型天气个例的气溶胶分类垂直剖面图。(a)2018 年 4 月 17 日 ;(b)2018 年 7 月 17 日 ;  
(c)2018 年 12 月 13 日 ;(d)2019 年 1 月 25 日

Fig. 8 Vertical profile of aerosol classification for typical weather cases observed by CALIOP. (a) April 17, 2018; (b) July 17, 2018; (c) December 13, 2018; (d) January 25, 2019

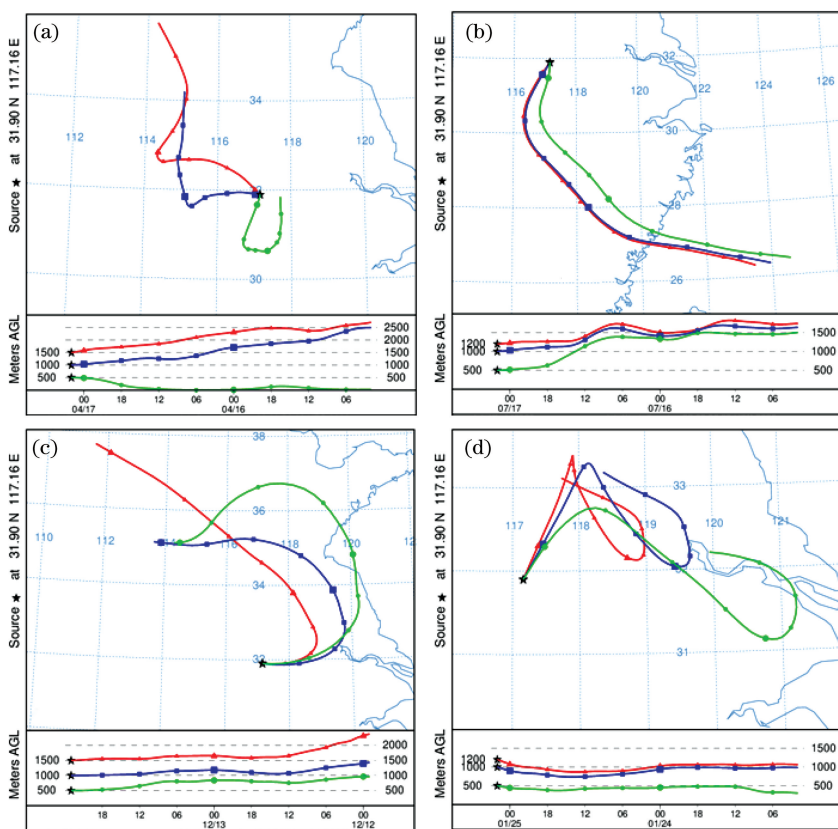


图 9 由 HYSPLIT 模式提供的气溶胶 48 h 后向轨迹。(a) 2018-04-17 ;(b) 2018-07-17 ;(c) 2018-12-13 ;(d) 2019-01-25  
Fig. 9 48-hour backward trajectory of aerosol provided by HYSPLIT mode. (a) 2018-04-17; (b) 2018-07-17; (c) 2018-12-13;  
(d) 2019-01-25



人为活动(工业排放、汽车尾气等原因)增加产生的浓度较低的气溶胶构成。2018 年 12 月 13 日当天,合肥上空 1.6 km 以下的气溶胶类型主要为污染扬尘型和污染大陆型,从后向轨迹看污染物主要由我国北方内蒙古 2 km 高度的浮尘输送所致,低空 1 km 以下的气溶胶粒子主要来自河南省西北部地区,因其经过我国东部重工业城市地区到达合肥上空,故污染物可能是浮尘、工业废气、汽车尾气等污染物的传输和聚集所致。后向轨迹的步长较长,说明大气流动性较强,空气中的浮尘和人为排放物传输至合肥上空与本地污染物充分混合,由于当天是小风天气,气溶胶在本地累积,导致中度污染天气。2019 年 1 月 25 日当天,合肥上空 1.4 km 以下的气溶胶类型主要为污染扬尘型和污染大陆型,从后向轨迹来看气溶胶粒子主要来自合肥周边地区和东部城市,气溶胶层的高度变化较小,步长较短,说明大气层结较为稳定,在合肥上空气溶胶粒子充分混合,从而导致了这次中度污染天气。

## 4 结 论

通过星-地激光雷达联合观测沙尘天气、多云天气、中度雾霾(无云)、中度雾霾(有云)气溶胶的垂直分布,并对探测结果进行分析,得出以下结论。

1)多云天气下,星载激光雷达对气溶胶探测时会受到天气影响,而地基激光雷达不受天气的影响,可以通过距离校正信号垂直剖面图准确地反映气溶胶的垂直分布。星-地激光雷达在无云天气的气溶胶探测结果具有很高的一致性,星-地激光雷达联合观测,可以更准确地反映气溶胶随时间、空间的变化。

2)不同天气状况的气溶胶变化存在很多不同之处,气溶胶的类型、气溶胶成因及来源也存在很大差异,通过激光雷达观测的气溶胶垂直分布,以及地面的颗粒物浓度数据、风速、风向等可以很好地解释气溶胶的变化及成因。

3)沙尘天气的气溶胶中存在粒径较大的颗粒物,因此退偏振比数值较大,气溶胶层中因气溶胶传输和沉降常伴有污染扬尘型的气溶胶。在多云天气下,即使地表空气质量优良,少量的气溶胶也会因人为活动的增加而出现。在中度污染天气下,如果云层较低,气溶胶和云层可以剧烈混合,相互作用。当大气层结稳定时,气溶胶容易在本地累积并无法扩散;当大气流动性较强时,雾霾天气中会有少量的污染扬尘型气溶胶和本地气溶胶混合,进而对气溶胶的变化和传输产生一定的作用。气溶胶中的粒子粒

径较小时,常具有球形粒子属性,此时气溶胶的退偏振比的数值较小。

## 参 考 文 献

- [1] Anderson T L, Charlson R J, Schwartz S E, et al. Climate forcing by aerosols—a hazy picture [J]. *Science*, 2003, 300(5622): 1103-1104.
- [2] Zhang Z J. Study on characteristics of aerosol optical property and spatio-temporal distribution based on multi-source datasets [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 11-16.  
张芝娟. 基于多源数据的气溶胶光学特性及时空分布特征的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 11-16.
- [3] Burkhardt U, Kärcher B, Schumann U. Global modeling of the contrail and contrail cirrus climate impact[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(4): 479-484.
- [4] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006: 15-27.
- [5] Pöschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005, 44(46): 7520-7540.
- [6] Liu Y, Wang M X, Zhang R J. The present status of aerosol research in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(4): 406-414.  
刘毅, 王明星, 张仁健. 中国气溶胶研究进展[J]. *气候与环境研究*, 1999, 4(4): 406-414.
- [7] Su Q X, Li J, Chen M Y. A review of atmospheric aerosol satellite remote sensing inversion research [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(36): 108-112, 114.  
苏倩欣, 李婧, 陈敏瑜. 大气气溶胶卫星遥感反演研究综述[J]. *科技创新导报*, 2019, 16(36): 108-112, 114.
- [8] He X, Zhou R, Yao Y, et al. The spatiotemporal variations of aerosol types in representative sites of China basing on the Aerosol Robotic Network (AERONET) [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 485-496.  
贺欣, 周茹, 姚媛, 等. 基于 AERONET 的中国地区典型站点气溶胶类型变化特征[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(2): 485-496.
- [9] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, et al. Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in haze-fog episodes in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(10): 3148-3155.
- [10] Kang C M, Lee H S, Kang B W, et al. Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM<sub>2.5</sub> species during hazy episodes in Seoul, South Korea

- [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38 (28): 4749-4760.
- [11] Yang J, Niu Z Q, Shi C E, et al. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7): 1425-1431.  
杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. *环境科学*, 2010, 31(7): 1425-1431.
- [12] Yang Y J, Yim S H L, Haywood J, et al. Characteristics of heavy particulate matter pollution events over Hong Kong and their relationships with vertical wind profiles using high-time-resolution Doppler lidar measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(16): 9609-9623.
- [13] Liu D, Tao Z M, Wu D C, et al. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001.  
刘东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228001.
- [14] Bo G Y, Liu D, Wu D C, et al. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days [J]. *Chinese Journal of 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.
- [15] Wang Y F, Cao X M, Zhang J, et al. Detection and analysis of all-day atmospheric water vapor Raman lidar based on wavelet denoising algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0201001.  
王玉峰, 曹小明, 张晶, 等. 基于小波去噪算法的全天时大气水汽拉曼激光雷达探测与分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0201001.
- [16] Luo H H, Chen Z Y, Zhang T S, et al. Comparison of aerosol vertical distribution based on CALIPSO satellite and ground observation data [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1201003.  
罗卉卉, 陈臻懿, 张天舒, 等. 基于 CALIPSO 卫星和地面观测资料的气溶胶垂直分布对比[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1201003.
- [17] Chen X L, Jin L J. Vertical distribution characteristics of aerosols in different weathers based on CALIPSO satellite[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020101.  
陈晓磊, 金莲姬. 基于 CALIPSO 卫星的不同天气类型下气溶胶垂直分布特征对比研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020101.
- [18] Xu C P, Ge J M, Huang J P, et al. Observations of dust aerosol over China based on CALIPSO spaceborne lidar [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(5): 1353-1362.  
徐成鹏, 葛颢铭, 黄建平, 等. 基于 CALIPSO 星载激光雷达的中国沙尘气溶胶观测[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1353-1362.
- [19] Fu S L, Xie C B, Zhuang P, et al. Study of persistent foggy-hazy composite pollution in winter over Huainan through ground-based and satellite measurements[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(11): 656.
- [20] Wu D, Wang Z, Wang B, et al. CALIPSO validation using ground-based lidar in Hefei (31.9°N, 117.2°E), China[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 185-195.
- [21] Zhang H, Tao Z M, Ma X M, et al. Fitting of hygroscopic factor between  $PM_{2.5}$  mass concentration and aerosol backscattering coefficient in Hefei area [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0704006.  
张辉, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 合肥地区  $PM_{2.5}$  质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的拟合[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0704006.
- [22] He W Y, Ling C, Chen H B, et al. Comparison of stratospheric aerosol derived from ground LiDAR and SAGE in Hefei [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(4): 540-548.  
何文英, 凌超, 陈洪滨, 等. 合肥地区平流层气溶胶地基激光雷达与 SAGE 卫星探测比较[J]. *遥感学报*, 2016, 20(4): 540-548.
- [23] Fang X, Wang M, Hu S X. Distribution characteristics of atmospheric pollutions in Meiyu season observed by lidar over Hefei [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0110003.  
方欣, 王敏, 胡顺星. 合肥梅雨季节大气污染物分布特征的激光雷达探测[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0110003.
- [24] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [25] Tan M, Xie C B, Wang B X, et al. Correlation study on boundary layer height and particulate matter concentration at Beijing in winter 2014 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0717007.  
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): 0717007.
- [26] Zhang X L. Linear depolarization ratios characteristics of dust aerosol particles model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0829001.  
张小林. 沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性[J].

- 光学学报, 2016, 36(8): 0829001.
- [27] Tao Z M, Liu D, Zhong Z Q, et al. Measurements of cirrus clouds with a three-wavelength lidar [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(5): 050101.
- [28] Mao F Y, Gong W, Li J. Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 907-912.

## Joint Observations of Vertical Distribution of Aerosols in Hefei Area by Spaceborne and Ground-Based Lidars

Yang Hao<sup>1,2,3</sup>, Xie Chenbo<sup>1,3\*</sup>, Fang Zhiyuan<sup>1,2,3</sup>, Wang Bangxin<sup>1,3</sup>, Xing Kunming<sup>1,3</sup>, Cao Ye<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China

### Abstract

**Objective** As aerosols easily spread biological organisms (such as viruses and germs) and exert an extinction effect, they pose serious threats to public health and travel. In addition, with the rapid development of China's economy, intensive industrial carbon emissions and automobile exhaust caused the increase of the amounts of man-made aerosols in many areas of China. Therefore, monitoring these aerosols by remote sensing is necessitated. Joint observations by space-borne and ground-based lidars can capture the temporal and spatial changes in aerosol emissions. The comparative studies under various weather conditions were rarely reported. The differences among the different weather conditions are still unclear. In this paper, we filtered the observation Aerosol-lidar data by matching the time at which the spaceborne CALIOP transits through Hefei under four typical weather conditions: dusty, cloudy, moderately polluted without clouds, and moderately polluted with clouds. We conducted joint aerosol observations in Hefei, and analyzed the types of aerosols, their changes, and the causes and sources of aerosol pollution.

**Methods** We compared the vertical distributions and profiles of the aerosols in the observation data of Aerosol-lidar and CALIOP. Using the PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentration data at the ground stations, we also determined the changes, vertical distributions, and causes of aerosols. The horizontal aerosol distributions were determined from the remote-sensing true-color images of MODIS. The causes of aerosol changes were deduced from the wind speeds and directions near the ground. Finally, the backward trajectories in the four study cases were analyzed in HYSPLIT mode. The lidar equation by the traditional Fernald algorithm was used in this article.

**Results and Discussions** According to the joint observations, the polluted dust aerosol in dusty (lightly polluted) weather was concentrated in the 0.8- to 1.6-km height range, and the dust type were dust and polluted dust. The depolarization ratio was concentrated in the 0.18–0.20 range. In cloudy weather, the main dust type was polluted continental type concentrated in the 0.4- to 1.2-km height range, with depolarization ratios between 0.015 and 0.020. The aerosol content was very small and the particles were fine and spherical. In moderately polluted cloudless weather, polluted dust coexisted with polluted continental-type aerosols. The particles were concentrated in the 0.3- to 1.3-km height range, and the depolarization ratio was below 0.080, indicating an obvious spherical attribute. In moderately polluted cloudy weather, polluted dust coexisted with polluted continental-type aerosols again, but the main height range was 0.8–1.4 km, and the depolarization ratio ranged from 0.075 to 0.100, indicating small-sized spherical particles. Small aerosols showed the properties of spherical particles with low depolarization ratios. The joint observations of space-borne and ground-based lidar more accurately captured and characterized the aerosol distributions at different time and from different locations than single observations. Although the ground-based lidar results were more accurate, the space-borne lidar provided better resolution for observing the spatial changes of aerosols. NOAA provided the HYSPLIT backward trajectory model for analyzing the sources and transport paths of the aerosols in the four weather cases. The HYSPLIT results confirmed different sources of the aerosols, to determine different conditions of aerosol formation by combining with the wind speeds and directions.

**Conclusions** Cloudy weather conditions affected the detection of the bottom aerosols by the space-borne lidar. To better obtain the aerosol content and the characteristics of its change, the range-corrected signal was continuously observed at fixed point by the ground-based lidar. The aerosol changes largely differed under different weather conditions, and the types, causes and sources of aerosols were also highly variable. When the stratification of the atmosphere is stable, aerosols tend to accumulate locally and cannot diffuse; in contrast, when the atmospheric fluidity is strong, a small amount of pollutant dust mixes with the local aerosols and the weather becomes hazy, resulting from the change and transmission of aerosols. The combination of various data, such as lidar observations and ground particle-concentration data, wind speed, and wind direction, can explain the changes and causes of aerosols. In future work, we should combine these data into comprehensive observations of weather changes, and thereby build a model for monitoring urban aerosol pollution.

**Key words** remote sensing; spaceborne and ground-based lidars; aerosol variation; vertical distribution; depolarization ratio

**OCIS codes** 010.1100; 010.0280