

# 基于 CALIPSO 卫星和地面观测资料的 气溶胶垂直分布对比

罗卉卉<sup>1,2</sup>, 陈臻懿<sup>1\*\*</sup>, 张天舒<sup>1\*</sup>, 范广强<sup>1</sup>, 项衍<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 利用地基激光雷达和 CALIPSO 卫星数据, 选取廊坊地区清洁天、霾天和多云 3 种天气个例, 对廊坊市气溶胶垂直分布特性进行对比分析, 并判断污染物的可能来源。结果表明不同天气类型下两个激光雷达反演的消光系数廓线整体一致, 相关系数高。清洁天气 2 km 以下有少量沙尘气溶胶, 消光系数均小于  $0.2 \text{ km}^{-1}$ , 退偏比集中在  $0.10 \sim 0.30$ , 色比值集中在  $0.5 \sim 1.0$ , 粒子非球形度高且粒径大; 霾天在低空 500 m 以下聚集着球形度高的细粒子污染物, 消光系数最高超过  $2 \text{ km}^{-1}$ , 退偏比和色比值都较小, 污染大陆型气溶胶和污染沙尘同时存在; 多云天气下, 垂直高度上只在出现云层的位置消光系数很大, 廓线有尖峰, 退偏比大部分小于 0.02, 色比集中在 0.10 左右, 受到上升气流的影响, 高空 7 km 以下都分布着少量沙尘气溶胶。

**关键词** 大气光学; 大气气溶胶; CALIPSO; 消光系数; 垂直分布

中图分类号 X831

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1201003

## Comparison of Aerosol Vertical Distribution Based on CALIPSO Satellite and Ground Observation Data

Luo Huihui<sup>1,2</sup>, Chen Zhenyi<sup>1\*\*</sup>, Zhang Tianshu<sup>1\*</sup>, Fan Guangqiang<sup>1</sup>, Xiang Yan<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** In this study, we analyze the vertical distribution characteristics of aerosols in the Langfang city on clean, hazy, and cloudy days based on the ground-based lidar and CALIPSO satellite data and determine the possible sources of pollutants. The analysis results denote that the extinction coefficient profiles of the two lidar inversions are consistent under clear, hazy, and cloudy conditions and that the correlation coefficient is large. Small amounts of dust aerosols below 2 km can be observed on clear days, with an extinction coefficient of less than  $0.2 \text{ km}^{-1}$ , a depolarization ratio concentrated in  $0.10 \sim 0.30$ , a color ratio concentrated in  $0.5 \sim 1.0$ , high particle non-sphericity, and large particle size. Below 500 m, there exists a collection of fine particles exhibiting high sphericity on hazy days, with a maximum extinction coefficient of greater than  $2 \text{ km}^{-1}$ , small depolarization and small color ratios. Additionally, the polluted continental aerosols and the polluted dust are observed to simultaneously exist. On cloudy days, the extinction coefficient is large at the vertical height, where cloud layers appear, and the profile shows a sharp peak. The depolarization ratio is mostly less than 0.02, and the color ratio is concentrated at approximately 0.10. Furthermore, a small amount of dust aerosols is distributed under the influence of an updraft below 7 km.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric aerosol; CALIPSO; extinction coefficient; vertical distribution

**OCIS codes** 010.1100; 010.3640; 010.1310

收稿日期: 2019-06-06; 修回日期: 2019-06-12; 录用日期: 2019-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0213100)、中国科学院青年创新促进会人才支撑计划

\* E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn; \*\* E-mail: zychen@aiofm.ac.cn

## 1 引言

云和气溶胶在地球辐射收支平衡和气候系统中扮演着重要角色。气溶胶粒子对地球长波辐射、太阳短波辐射的吸收及散射会影响地气系统的辐射收支平衡,它也可作为云的凝结核,引起间接辐射,影响气候变化。气溶胶的垂直分布特性可以影响大气辐射热量的垂直廓线,从而改变大气的稳定性,影响对流和湍流运动以及云的寿命<sup>[1]</sup>,是评估气溶胶辐射效应的关键因素之一。因此探测气溶胶垂直分布特征对研究气候变化有重要意义。激光雷达作为研究大气气溶胶各项光学性质、空间垂直分布的重要大气环境监测工具,具有高灵敏度和高时空分辨率的优势,其发射的激光束能与大气中的气溶胶和云粒子相互作用。接收激光束与大气相互作用的后向散射信号,反演出一些重要的大气参数值,是分析气溶胶垂直结构分布的重要手段。

目前主要有地基和卫星两大类激光雷达应用于大气环境观测。地基激光雷达可以长期定点观测,探测精度高但探测区域受限,只能探测一维垂直高度上气溶胶的分布特征。CALIPSO (the cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation) 卫星于 2006 年 4 月由美国宇航局发射升空,星上有载荷正交偏振云-气溶胶激光雷达 CALIOP (cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization),可连续观测垂直于卫星飞行轨迹方向上的全球范围内气溶胶的垂直分布和云的特征信息。CALIOP 探测范围广、分辨率高,能有效识别云的成分、确定气溶胶层和识别气溶胶类型等。

近年来国内外学者利用地基、机载激光雷达或其他卫星数据与 CALIPSO 卫星联合观测气溶胶的空间、垂直分布,并对 CALIPSO 的气溶胶数据质量进行验证研究。Wu 等<sup>[2]</sup>认为 CALIPSO Level1 数据后向散射系数与地基激光雷达相关系数达到 0.92; CALIPSO Level2 数据在气溶胶类型分类方面表现良好,有明显的气溶胶层, CALIPSO 反演结果与地基激光雷达无明显偏差。谭静等<sup>[3]</sup>在青海格尔木地区将地基激光雷达反演的气溶胶消光系数结果与 CALIPSO 卫星数据进行了对比,两者具有良好的一致性,验证了 CALIPSO 所获数据的可靠性。温春等<sup>[4]</sup>利用 CALIPSO 星载激光雷达资料计算地基偏振拉曼激光雷达 (LZU-lidar) 系统的几何重叠因子,并认为晴天条件下 CALIPSO 和 LZU-lidar 的气溶胶后向散射系数、退偏比和色比的反演结果

有较好的一致性,有云条件下两者在中高层的反演结果较好,低层有较大差异。高星星等<sup>[5]</sup>利用 CALIPSO 卫星 Level2 产品,分析中国气溶胶光学厚度(AOD)的季节空间分布、季节光学属性及其垂直分布特征,并结合 AERONET 观测数据对气溶胶的季节光学属性进行了验证。

本文选取 CALIPSO 卫星资料、地面激光雷达数据资料及地面空气质量浓度观测资料综合分析不同天气个例下的气溶胶垂直分布,并进一步讨论污染物可能的来源和形成机理。

## 2 数据来源

CALIPSO 卫星上载有 3 个有效载荷,即双波长偏振激光雷达 (CALIOP)、红外成像辐射计 (IIR)、宽视场相机 (WFC)。CALIOP 以 20.16 Hz 的重复脉冲频率发射 532 nm 和 1064 nm 双波长的激光脉冲,接收 3 个通道的回波信号,包括 1064 nm 的后向散射信号和 532 nm 后向散射信号的正交偏振分量<sup>[6-7]</sup>,它在 8 km 高度以下垂直分辨率为 30 m,水平分辨率为 333 m,在 8~20 km 高度上垂直分辨率为 60 m。该研究使用 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,包括 532 nm 消光系数、532 nm 退偏比 (PDR)、色比 (CR) 以及 Level2 垂直特征层产品 (VFM)。PDR 和 CR 的相关方程为

$$\text{PDR: } \delta(z) = \frac{\beta_{532\perp}(z)}{\beta_{532\parallel}(z)}, \quad (1)$$

$$\text{CR: } \chi(z) = \frac{\beta_{1064}(z)}{\beta_{532\text{total}}(z)}, \quad (2)$$

式中:  $\delta(z)$  为退偏比;  $\chi(z)$  为色比;  $z$  为高度; 532 nm 总后向散射系数  $\beta_{532\text{total}}$  为垂直  $\beta_{532\perp}$  与平行  $\beta_{532\parallel}$  后向散射系数之和;  $\beta_{1064}$  为 1064 nm 后向散射系数。PDR 为  $\beta_{532\perp}$  与  $\beta_{532\parallel}$  的比值,反映气溶胶粒子的不规则程度,其值越大粒子越趋向于非球形, CR 为  $\beta_{1064}$  与  $\beta_{532\text{total}}$  之比,反映气溶胶粒子的尺度特征,其值越大粒子尺寸越大。

参照 Liu 等<sup>[8-9]</sup>的气溶胶分类方法,通常把后向散射系数为  $0 \sim 8 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  的颗粒定义为大气分子,后向散射系数为  $4.5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  的颗粒定义为云,后向散射系数为  $8 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  的颗粒定义为气溶胶;把 PDR 小于 0.06 的颗粒认为是球形气溶胶,大于 0.06 的颗粒认为是非球形气溶胶;CR 值小于 0.5

的定义为细粒子,大于 0.5 的气溶胶定义为粗粒子。CALIOP 的 Level2 VFM 产品使用云-气溶胶分类识别算法与气溶胶层分类算法<sup>[10-11]</sup>判别接收的信号,识别出垂直方向上不同高度的气溶胶类型,并将气溶胶分为清洁大陆型、清洁海洋型、烟尘、沙尘、污染沙尘及污染大陆型 6 种类型。为提高数据质量,需对 CALIOP 的 Level2 气溶胶廓线产品进行质量控制,通过基本品质筛选参数 AVD、CAD score 和消光不确定参数 extinction QC 这 3 种筛选手段<sup>[12]</sup>提取出高可靠性数据,最后再求平均值得到平均消光系数、平均 PDR 和平均 CR 廓线。

地基数据来源于廊坊市环境监测中心(39.55°N,116.71°E)的米氏散射激光雷达反演得到的 532 nm 消光系数实时资料。该激光雷达由 Nd:YAG 激光器、激光发射和信号接收的光学系统、高灵敏度光电探测器、高速多道计数系统及控制、数据处理软件组成。激光器的工作波长为 532 nm,脉冲宽度为 12 ns,脉冲重复频率达到 2000 Hz,探测器采用光电倍增管(PMT)单光子计数探头,口径为 180 mm,空间分辨率为 7.5 m。接收到的地基弹性散射回波信号由 Fernald 反演法反演得到后向散射系数、消光系数。

以廊坊市环境监测中心站点为中心,划定研究区域对象(39°N~40°N,116°E~117°E),并认为当 CALIPSO 卫星经过该区域时,提取的数据可代表该时段廊坊研究站点的气溶胶平均状况<sup>[13]</sup>。对近两年的 CALIPSO 和地基激光雷达资料的数据匹配

后,摒弃了 CALIPSO 数据筛选不可靠的无效数据、雨雪天数据、空气轻度或中度污染的数据,从中选取三天典型天气类型个例,采用的数据分别为 2018 年 12 月 4 日(清洁天气)、2017 年 12 月 3 日(雾霾天)和 2018 年 11 月 21 日(多云天气)这三天。卫星过境期间的气溶胶消光系数、PDR 和 CR 数据反映不同天气类型下气溶胶垂直分布,提取地基激光雷达在卫星过境时间段的消光系数反演结果,与 CALIPSO 的消光系数数据作比较。

廊坊地区的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 逐时质量浓度来源于环境监测总站发布的空气质量资料,并使用 HYSPLIT (hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory) 后向轨迹模式分析不同高度上污染物的可能来源。

### 3 结果分析

图 1 为当天三种天气个例的 CALIPSO 卫星的轨迹路线,图中方框为划定的研究对象(39°N~40°N,116°E~117°E),线条为经过廊坊上空的卫星轨迹。卫星过境廊坊区域时刻为 2018 年 12 月 4 日(清洁天)13:30 左右、2017 年 12 月 3 日(霾天)02:20 左右和 2018 年 11 月 21 日(多云)02:20 左右;三种类型天气下的卫星过境廊坊当天的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的 24 h 质量浓度变化如图 2 所示;三种类型天气下在 33°N~43°N 纬度上 CALIPSO 卫星过境观测到的气溶胶后向散射系数剖面图如图 3 所示。

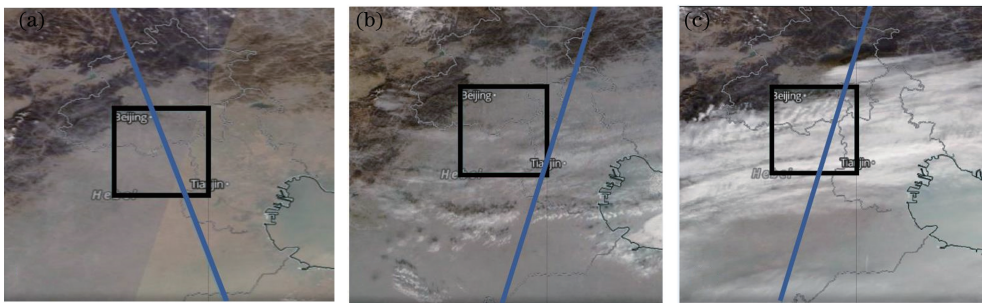


图 1 CALIPSO 卫星轨迹。(a)清洁天气;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 1 Transit trajectories of CALIPSO satellite. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

2018 年 12 月 4 日廊坊市为晴天。由图 2(a)可见一整天 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均小于 40  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,在早晨 08:00 之前 PM<sub>10</sub> 的质量浓度稳定在 80  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右,08:00 以后质量浓度逐渐升高,在中午 14:00 达到最大值 133  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,随后浓度逐渐下降,18:00 后质量浓度又小幅上升。CALIPSO 卫星过境时刻廊坊市 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分别为 106  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、

20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,研究区域空气质量为良,有轻微扬尘。由图 3(a)看出卫星扫过的区域路线上整体后向散射系数很小,整个气溶胶层的后向散射系数不超过  $2.5\times 10^{-3} \text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。

2017 年 12 月 1-3 日京津冀地区经历了一次强霾污染过程。由图 2(b)可见从 12 月 2 日 12:00-20:00,PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度较高且一直在



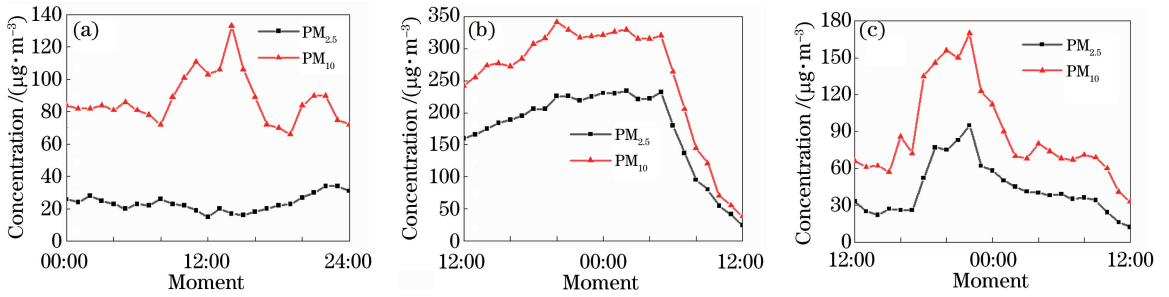


图 2  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度变化。(a) 清洁天气；(b) 霾；(c) 多云天气

Fig. 2 Variations of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  mass concentrations. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

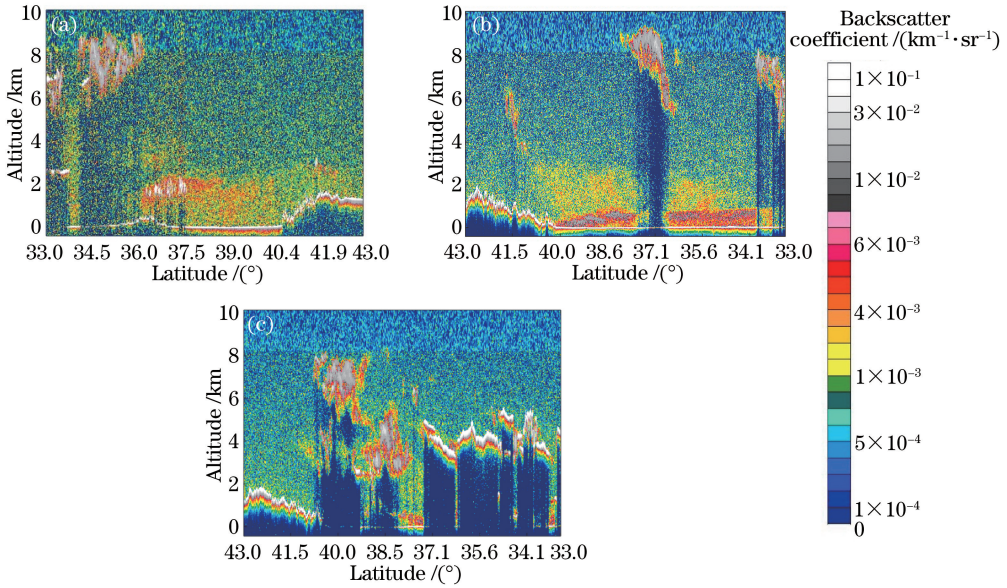


图 3 气溶胶后向散射系数剖面图。(a) 清洁天气；(b) 霾；(c) 多云天气

Fig. 3 Backscatter coefficient profiles of aerosol. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

缓慢上升, 20:00 达到最大值,  $PM_{10}$  浓度升至  $342 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $PM_{2.5}$  质量浓度达到  $226 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 之后一直到 12 月 3 日 05:00,  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  的质量浓度一直维持在高值区域, 05:00 以后质量浓度迅速下降, 到 12:00  $PM_{10}$  浓度下降到  $38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $PM_{2.5}$  质量浓度降至  $24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。CALIPSO 卫星过境时刻廊坊市  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度分别为  $330 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $234 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 研究区域空气质量为重度污染。如图 3(b) 所示, 卫星扫过的整个华北区域 1 km 以下后向散射系数非常大, 最大可达到  $4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ , 污染非常严重。

2018 年 11 月 21 日廊坊地区上空有云层出现。由图 2(c) 可见 11 月 20 日 12:00 开始  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度总体逐渐上升, 到晚上 22:00  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度达到最大值, 分别为  $170 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 22:00 之后直到 11 月 21 日中午 12:00,  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度整体呈现下降趋势。CALIPSO 卫星过境时刻廊坊地区

$PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度分别为  $106 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 研究区域空气质量为良好。由图 3(c) 看出卫星扫过的华北区域在不同高度呈现出灰白色, 后向散射系数大于  $7.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ , 依据 Liu 等<sup>[8-9]</sup>的气溶胶分类方法, 灰白色区域是云层的位置。华北区域整个垂直高度上其他区域的后向散射系数都低于  $2.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ , 有轻微污染。

### 3.1 消光系数的对比分析

在  $39^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$  纬度范围内分别对 2018 年 12 月 4 日、2017 年 12 月 3 日和 2018 年 11 月 21 日这三天 CALIPSO 卫星观测到的 532 nm 消光系数进行廓线平均, 平滑处理。相应地, 在 CALIPSO 卫星过境时间点前后 0.5 h 范围内对地面激光雷达观测的 532 nm 消光系数进行廓线平均。CALIPSO 卫星数据是相对海平面高度, 地基雷达数据是相对于廊坊市实际地面高度, 廊坊市海拔很低, 高度为 18 m, 所以两者数据的处理过程忽略高度的匹配。



图 4 为三种类型天气下两种激光雷达观测到的气溶胶平均消光系数廓线图。

由图 4(a)显示,清洁天气 CALIPSO 卫星与地基激光雷达的消光系数观测值略微有差异,但整体变化趋势一致,两个廓线的相关系数达到 0.83。气溶胶层存在于 2.8 km 以下,整个气溶胶层消光系数不超过  $0.2 \text{ km}^{-1}$ ,近地面到 1.8 km 高度处,CALIPSO 观测到的消光系数在  $0.1 \text{ km}^{-1}$  左右浮动,变化较小。由图 4(b)可看出雾霾发生时两个激光雷达都监测到强污染区域,且强污染区域主要在 500 m 以下,两者在近地面处有差异,整体趋势一致,两个廓线的相关系数为 0.84。CALIPSO 观测到垂直高度上平均 532 nm 消光系数总体随高度增加而减小,近地面的气溶胶消光系数超过  $2 \text{ km}^{-1}$ ,远远大于

清洁天气时的消光系数。1~3 km 高度消光系数接近于 0,3.2 km 以上高空无明显的气溶胶层;地基激光雷达监测到 3 km 以下有气溶胶层,800 m 以上消光系数非常小,峰值出现在大约 300 m 处,消光系数达到  $2.25 \text{ km}^{-1}$ 。由图 4(c)可看出 CALIPSO 和地基激光雷达都检测到在 2~3 km 之间存在云层,在 2.5 km 附近出现一个消光系数峰值,达到  $1.3 \text{ km}^{-1}$ ,两个廓线的相关系数为 0.50。CALIPSO 监测到在 3.2 km 附近出现一个小消光系数峰值,约为  $0.3 \text{ km}^{-1}$ ,云层下方消光系数迅速减小,2 km 以下有一层很薄的气溶胶层,消光系数在  $0.1 \text{ km}^{-1}$  左右;地基激光雷达监测到云层上方消光系数迅速减小为 0,3 km 以上未监测到明显气溶胶层,1 km 以下可监测到明显的气溶胶层,消光系数值在 0.3 左右。

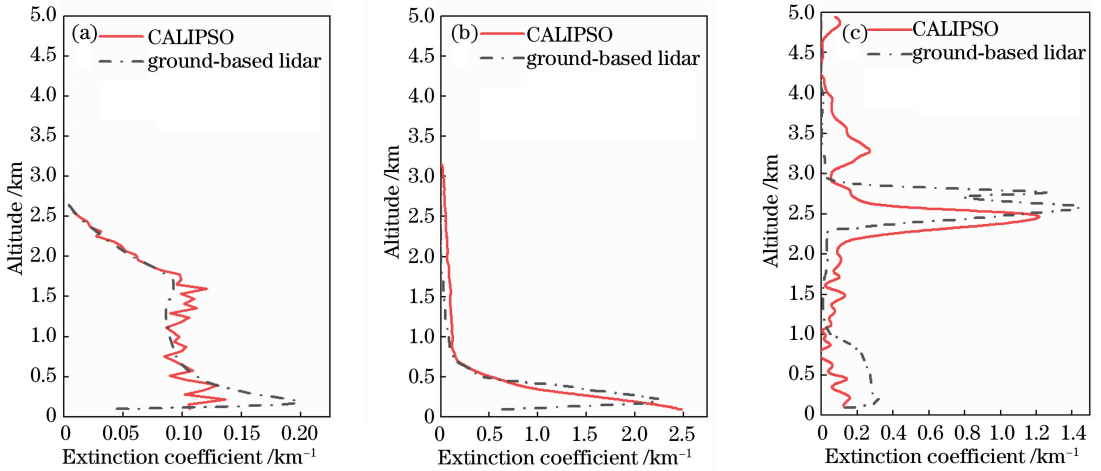


图 4 两种激光雷达反演的平均 532 nm 消光系数廓线。(a)清洁;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 4 Mean 532-nm extinction coefficient profiles for two lidar inversions. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

### 3.2 退偏比和色比分析

在  $39^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$  纬度范围内分别对 2017 年 12 月 4 日、2017 年 12 月 3 日和 2018 年 11 月 21 日这三天 CALIPSO 观测到的 532 nm 退偏比、色比数据进行廓线平均,平滑处理。不同天气类型下平均 532 nm 退偏比、平均色比廓线图如图 5 和图 6 所示。针对三种类型天气下不同高度上气溶胶退偏比、色比频率分布如图 7 和图 8 所示。

由图 5~8 可见,清洁天气气溶胶层的退偏比整体集中在 0.10~0.30 之间,以不规则的粒子分布为主,统计退偏比在 0.10 以下的频率只在 0~0.5 km 高度上占比 14%,0.5~1 km 高度上占比 22%,随着高度的增加粒子的不规则程度越高;平均色比较大,大部分集中在 0.5~1 之间,气溶胶粒子颗粒较大,统计色比在 0.50 以下的频率只在 2~3 km 高度上占比 45%。

在高度 0.5 km 以下,雾霾天气的气溶胶粒子的平均退偏比均小于 0.10,平均色比在 0.25~0.50 之间;0~0.5 km 统计退偏比在 0.06~0.10 之间的频率比例为 100%,统计色比在 0.50 以下所占频率比例为 100%,近地面气溶胶层为球形度高的细粒子气溶胶分布。随着高度上升退偏比逐渐增大,但都低于 0.20,色比增大,粒子半径逐渐增大。2.5 km 以上平均退偏比和色比整体都呈现减小的趋势。

在高度 3 km 以下,多云天气的退偏比和色比都很小,退偏比大部分小于 0.02,色比集中在 0.10 左右;在 3 km 高度处退偏比廓线达到一个峰值为 0.08 的尖峰,3~4 km 总体趋势逐渐减小,4~5 km 又逐渐增大;在 3~4.2 km 高度上色比廓线整体逐渐增大,在 4.2 km 高度处急速减小,在 4.2~5 km 高度上整体又逐渐增大。这与 CALIPSO 观测到的消光系数廓线出现云层的位置相吻合。

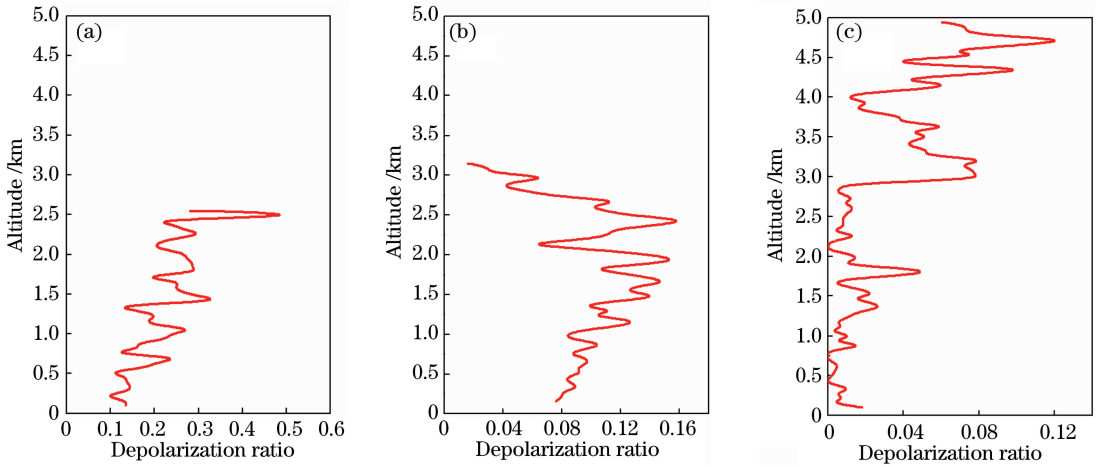


图 5 平均 532 nm 退偏比廓线。(a)清洁天;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 5 Mean 532-nm depolarization ratio profiles. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

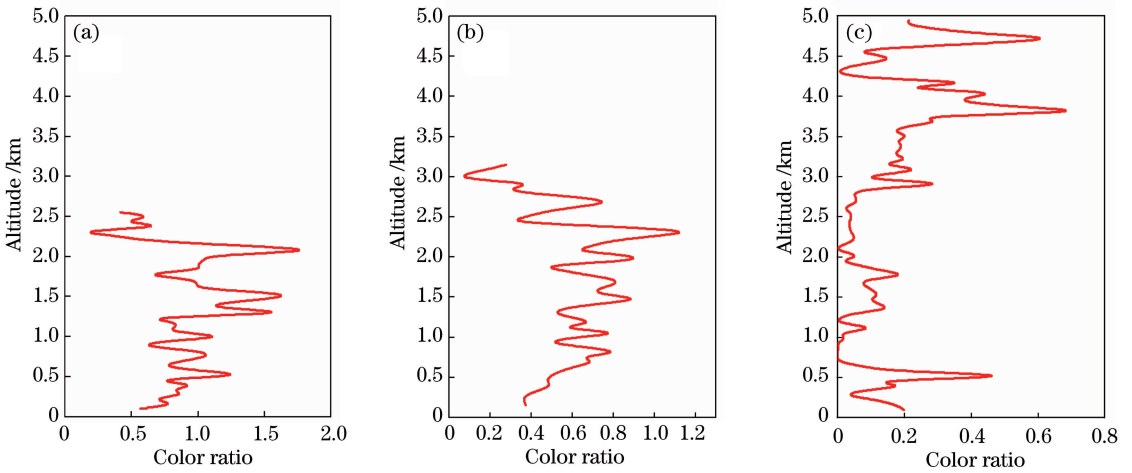


图 6 平均色比廓线。(a)清洁天;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 6 Mean color ratio profiles. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

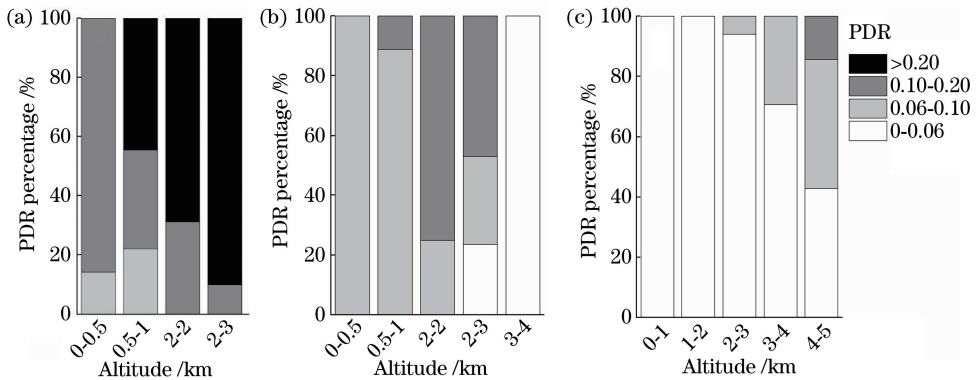


图 7 不同高度上气溶胶退偏比频率分布。(a)清洁天;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 7 Depolarization-ratio frequency distributions of aerosol at different altitudes. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

### 3.3 气溶胶类型分类和后向轨迹分析

由 CALIOP 的 Level2 VFM 产品得到卫星轨迹路线上在清洁天、霾天和多云天气下气溶胶类型分类剖面图,如图 9 所示。图 10 分别为 2018 年 12

月 4 日 14:00(清洁天气)、2017 年 12 月 3 日 02:00(霾天)和 2018 年 11 月 21 日 02:00(多云)这三个时间点以廊坊环境监测站点为中心的 48 h HYSPLIT 后向轨迹图(图中时间为 UTC 世界时,

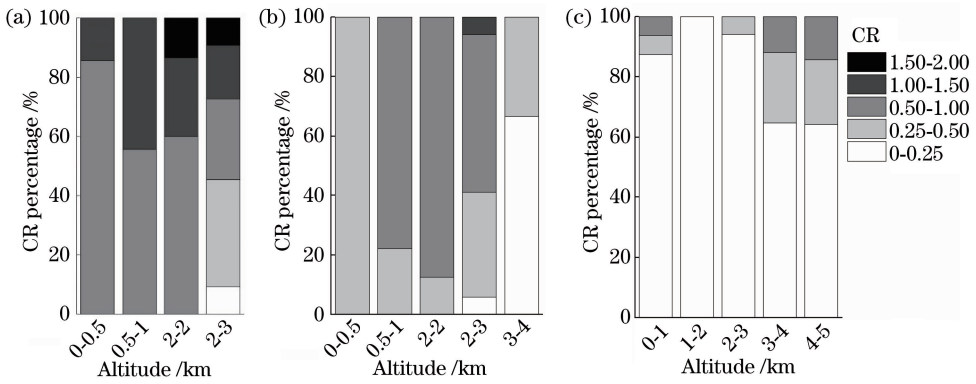


图 8 不同高度上气溶胶色比频率分布。(a)清洁天;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 8 Color-ratio frequency distributions of aerosol at different altitudes. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

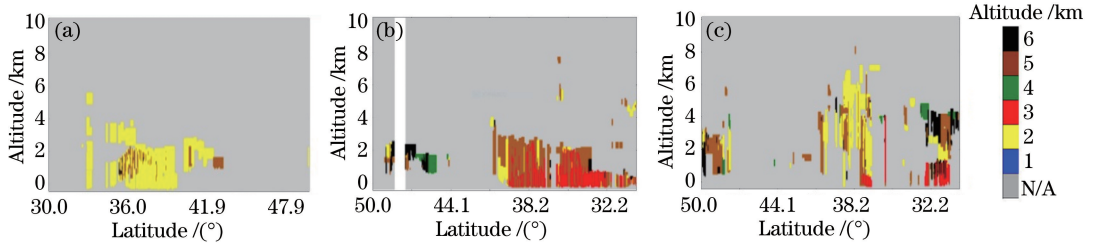


图 9 气溶胶类型分类。(a)清洁天;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 9 Aerosol type classification. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

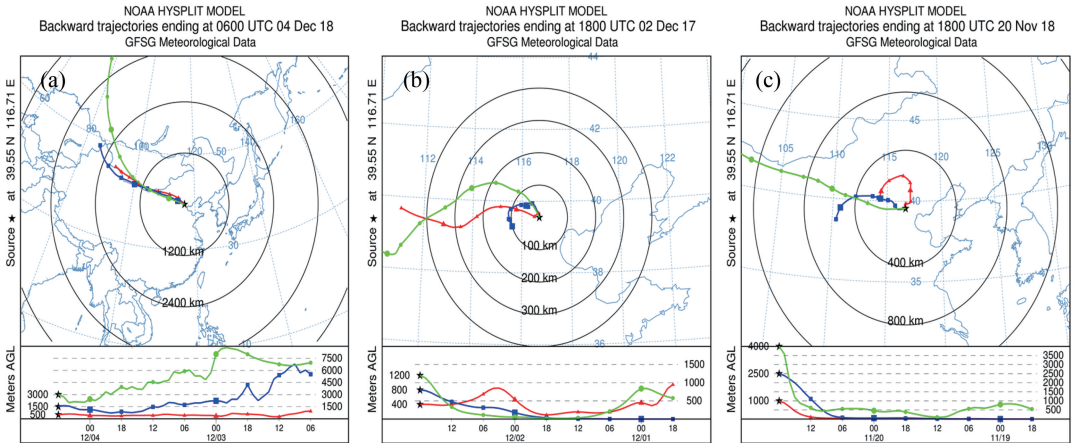


图 10 48 h HYSPLIT 后向轨迹图。(a)清洁天;(b)霾;(c)多云天气

Fig. 10 HYSPLIT back trajectories in 48 h. (a) Clean day; (b) haze; (c) cloudy day

Meters AGL 为 meters above ground level)。

根据图 9、图 10 不同天气下的气溶胶类型分布和后向轨迹,清洁天的气象轨迹从西北方向蒙古国而来,迹线很长且分布高度很高,说明大气不稳定、空气流动性强,但是低空高度也聚集着沙尘气溶胶,并夹杂着少许污染型沙尘气溶胶,这可能由于汽车尾气、地面及工业扬尘等所致<sup>[14]</sup>。霾天选取的低空 400、800 和 1200 m 的轨迹线长度较短且分布高度不高,说明大气层结稳定,会导致污染物的积累。污染气团来源于西部偏北的周边地区,气溶胶类型是污染大陆型和污染沙尘型气溶胶的混合,因此霾污

染的主要成因为西北方向周边地区污染源的排放积聚和沙尘的输送<sup>[15]</sup>。多云天气下,位置点上高度越高,后向轨迹迹线长度越长,不同高度的气团来源均是近地面气团在 11 月 20 日 14:00 开始上升的上升气流。从近地面到 7 km 高度上,都有少量分散着沙尘气溶胶,这些气溶胶夹杂着污染沙尘。因此空气的大规模上升运动会形成云层,同时上升气流也会携带近地面的沙尘至高空,使得 7 km 高空以下都分布着少量沙尘气溶胶。

### 3.4 反演结果差异来源

CALIOP 的 Level2 产品最大的不确定性因素



是反演过程中云、气溶胶的区分和气溶胶类型识别这两个步骤。云和气溶胶的区分由概率密度函数(PDF)计算的置信函数决定,该 PDF 由层次中心高度、532 nm 后向散射系数和色比等特征参数计算<sup>[16]</sup>。气溶胶的类型取决于粒子的形态、尺寸、折射率和粒径分布等,气溶胶类型识别主要依据雷达信号的后向散射系数、退偏比、下垫面类型、层次所在地理位置等特征属性,设计出数据筛选流程来决定各气溶胶层最可能的类型。这两个步骤主要依据以往的经验,在实际应用中可能会发生错误识别。这些是 CALIOP 数据本身存在的不确定性,这些不确定性会让偏差在反演过程中传递。

CALIPSO 与地基激光雷达对清洁天、霾天和多云这三天的消光系数反演廓线相关系数分别为 0.83、0.84 和 0.50,除多云天气外,其他廓线相关性较高。地基和星载激光雷达探测方向相反会导致探测信号的衰减方向不同,当探测到同一气溶胶或云特征层时,CALIPSO 卫星发射的激光信号在特征层下方会发生能量衰减,而地基激光雷达的探测信号在特征层上方会发生能量衰减<sup>[17]</sup>。CALIPSO 卫星在高空中探测距离远,飞行速度也很快,所以 CALIPSO 激光雷达信号的信噪比不及地基激光雷达。两种激光雷达的空间和时间分辨率不同,CALIPSO 是轨迹线观测,地基雷达是定点观测,两者时间和地点不能够完全契合,这给两者的反演结果对比增加一定不确定度。地基激光雷达在低空区域受到几何重叠因子的影响<sup>[18]</sup>,与 CALIPSO 在近地面高度上的反演结果存在一定差异。

## 4 结 论

通过典型的清洁天气、雾霾天气和多云天气下这三天数据的分析,可以得出:

1) CALIPSO 星载激光雷达和地基激光雷达在清洁天和雾霾天对气溶胶消光系数的反演结果总体一致,有较高的可信度,在近地面高度上存在一定的差异。在多云天气下两者反演结果存在一定差异。

2) 不同天气类型下气溶胶的垂直分布差异很大。一种天气类型可能有多种气溶胶类型的混合,不同天气类型的主导气溶胶类型也会不同。

3) 清洁天气虽然空气流动性强,但在低空也会有地面扬尘等,以非球形度高的粒径的沙尘气溶胶为主,气溶胶消光系数小,退偏比和色比值偏大;雾霾期间大气稳定,空气扩散条件差,近地面聚集着大量球形度高的细粒子气溶胶,消光能力强,同时也会

有少量粗粒子沙尘气溶胶;在多云天气下,出现云层的位置消光系数会突然增大,上升气流会使近地面到高空都分布着少量沙尘气溶胶。

## 参 考 文 献

- [1] Johnson B T, Heese B, McFarlane S A, *et al.* Vertical distribution and radiative effects of mineral dust and biomass burning aerosol over West Africa during DABEX[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D23): D00C12.
- [2] Wu Y H, Cordero L, Gross B, *et al.* Assessment of CALIPSO attenuated backscatter and aerosol retrievals with a combined ground-based multi-wavelength lidar and sunphotometer measurement [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 84: 44-53.
- [3] Tan J, Pan W L, Zhu K Y, *et al.* Ground-based lidar measurements of aerosol vertical distributions in Golmud, Qinghai [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2015, 35(4): 63-70.  
谭静, 潘蔚琳, 朱克云, 等. 青海格尔木大气气溶胶地基激光雷达观测研究[J]. *高原山地气象研究*, 2015, 35(4): 63-70.
- [4] Wen C, Huang Z W, Zhou T, *et al.* Contrast observation of spaceborne CALIPSO lidar and a ground-based polarized Raman lidar [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(5): 779-788.  
温春, 黄忠伟, 周天, 等. 地基偏振拉曼激光雷达与 CALIPSO 星载激光雷达的对比观测研究[J]. *干旱气象*, 2016, 34(5): 779-788.
- [5] Gao X X, Chen Y, Zhang L, *et al.* Aerosol properties based on CALIPSO data in representative regions over China [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 2018, 54(4): 431-439.  
高星星, 陈艳, 张镭, 等. 基于 CALIPSO 卫星数据的中国典型区域气溶胶特性[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(4): 431-439.
- [6] Yu C X, Yang Y J, Deng X L, *et al.* Vertical distribution characteristics of aerosol optical properties on haze and clear day in Hefei based on CALIOP satellite measuring [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1677-1683.  
于彩霞, 杨元建, 邓学良, 等. 基于 CALIOP 探测的合肥气溶胶垂直分布特征[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1677-1683.
- [7] Xu X F, Liu C X, Tang Z W, *et al.* Characteristics of aerosol vertical distribution based on CALIPSO over North China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018, 41(1): 126-134.  
许潇锋, 刘晨璇, 唐志伟, 等. 基于 CALIPSO 的华北地区气溶胶垂直分布特征[J]. *大气科学学报*,

- 2018, 41(1): 126-134.
- [8] Liu Z Y, Vaughan M A, Winker D M, *et al.* Use of probability distribution functions for discriminating between cloud and aerosol in lidar backscatter data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109 (D15): D15202.
- [9] Liu Z Y, Omar A, Vaughan M, *et al.* CALIPSO lidar observations of the optical properties of Saharan dust: a case study of long-range transport [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (D7): D07207.
- [10] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, *et al.* Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323.
- [11] Winker D, Vaughan M, Hunt B. The CALIPSO mission and initial results from CALIOP [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6409: 640902.
- [12] Shen X X. Study on regional aerosol properties based on CALIPSO [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014: 34-41.  
沈仙霞. 基于 CALIPSO 卫星的区域气溶胶特性研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2014: 34-41.
- [13] Xie Y H, Cao N W, Zhu C X, *et al.* Comprehensive observation of aerosol scattering properties in Nanjing [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2016, 28(3): 237-244.  
谢银海, 曹念文, 祝存兄, 等. 南京地区气溶胶散射特性综合观测 [J]. *光散射学报*, 2016, 28(3): 237-244.
- [14] 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.
- [15] Liu C, Su L, Zhang C Y, *et al.* Comparative analysis of vertical distribution of aerosols by using spaceborne lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0413001.  
刘聪, 苏林, 张朝阳, 等. 星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0413001.
- [16] Zheng S Q, Xu J, He Y J, *et al.* Satellite cloud-aerosol lidar- CALIOP: capability, product and its applications [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2014, 4(4): 313-320.  
郑韶青, 徐峻, 何友江, 等. 星载激光雷达 CALIOP 功能、产品和应用 [J]. *环境工程技术学报*, 2014, 4(4): 313-320.
- [17] Mamouri R E, Amiridis V, Papayannis A, *et al.* Validation of CALIPSO space-borne-derived attenuated backscatter coefficient profiles using a ground-based lidar in Athens, Greece [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(2): 513-522.
- [18] Qi B Y, Chen S Y, Zhang Y C, *et al.* Geometric form factor retrieval method for ground-based lidar based on ground-based and space-borne synchronous observation data [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 091003.  
齐白玉, 陈思颖, 张寅超, 等. 星地同步观测数据的地基激光雷达几何因子反演方法 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 091003.