

利用星载和地基激光雷达分析

2019 年 5 月东亚沙尘天气过程

黄悦¹, 陈斌¹, 董莉¹, 张芝娟²

1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000

2. 太原理工大学环境科学与观测学院, 山西 太原 030000

摘要: 2019 年 5 月中旬, 中国北方出现大范围沙尘暴天气, 此次天气过程持续时间较长, 影响范围较大。利用星载激光雷达 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 和地基激光雷达 AD-NET (Asian Dust and aerosol lidar observation NETwork) 数据, 对此次沙尘天气过程中沙尘气溶胶的分布特征以及沙尘传输过程进行分析; 利用国家气象信息中心提供的小时天气实况数据对星载激光雷达资料以及后向轨迹模型 HYSPLIT (the HYbird Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 得到的传输路径进行验证, 同时结合空气质量数据分析此次天气过程对空气质量的影响; 利用欧洲中心 ERA-Interim 再分析资料对此次沙尘天气成因进行分析。结果表明: (1) 2019 年 5 月 10 日至 16 日沙尘天气主要分为两阶段, 第一阶段为 5 月 10 日至 12 日, 第二阶段为 13 日至 16 日; (2) 通过 CALIOP 垂直特征层产品, 发现在太平洋地区 5km 至 10km 的较高高度上, 存在沙尘气溶胶, 到达日本地区时, 沙尘气溶胶的退偏比和色比平均值分别为 0.14 和 1.29; (3) 经过星载和地基激光雷达数据的综合分析, 发现 5 月 13 日至 18 日期间, 沙尘气溶胶对日本长崎站点和韩国济州岛地基激光雷达站点的平均贡献率均值分别为 42.16% 和 39.25%; (4) 筛选了星载激光雷达经过日本和韩国站点的轨迹, 对比分析两种数据的衰减后向散射系数以及表观散射比, 发现两种数据的表观散射比廓线分布具有相近的变化趋势; (5) 在沙尘天气期间, 颗粒物浓度显著增加, PM_{10} 浓度最大值超过 $1500 \mu g/m^3$, 是国家一级浓度标准的 30 倍; 而 5 月 11 日 $PM_{2.5}$ 浓度在甘肃省最大, 最大值达到国家一级浓度标准的 7 倍, 14 日最大值甚至达到 12 倍; $PM_{10}/PM_{2.5}$ 值也在甘肃新疆多地达到 6 以上; (6) 内蒙古西部的小槽的加深以及南压, 使得西北冷空气稳定南下; 在 14 日, 不稳定层结加深导致沙尘天气再一次爆发。

关键词: 激光雷达 沙尘气溶胶 光学性质 色比 PM_{10}

文章编号: 2019249B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.19249

Analysis of a dust weather over the East Asia in May 2019 based on CALIPSO satellite and ground-based lidar data

Huang Yue¹, Chen Bin¹, Dong Li¹, Zhang Zhijuan²

收稿日期 2019-12-17; 网络预出版日期

作者简介 黄悦, 女, 硕士, 1995 年出生, 研究方向为卫星遥感。E-mail: huangy2018@lzu.edu.cn

通信作者 陈斌, E-mail: chenbin@lzu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41775021, 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (lzujbky-2019-43)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41775021), Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant lzujbky-2019-43)

1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Gansu Province, Lanzhou 730000

2. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Shanxi Province,
Taiyuan 030000

Abstract: In May 2019, a strong sandstorm appeared in northern China, lasting for a long time and influencing large-scale areas. The optical properties, vertical distribution and the transmission of the dust aerosols are analyzed using the data from the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) and the ground-based lidar (Asian Dust and aerosol lidar observation NETwork, AD-NET). At the same time, the track of this dust process is validated by the hourly data from the China Meteorological Data Service Center and the HYbird Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model, the influence on air quality by the air-quality data from the PRC State Environmental Protection Administration. In addition, ERA-interim reanalysis data are used to analyze the causes of the dust weather. The results show that: (1) The sand-storm process can chiefly be divided into two stages, the first stage is from May 10th to 12th and from 13th to 16th is the second. (2) The dust aerosols exist at a high altitude of 5-10km in the Pacific region, and the depolarization ratio and the color ratio of dust are 0.14 and 1.29 individually. (3) After the comprehensive analysis of the data from the spaceborne and ground-based lidar, it was found that the dust was transmitted to Jeju in South Korea and Fukuoka in Japan, and the dust aerosol contributions are 39.25%, 35.43% respectively. (4) The comparison of the attenuation backscattering coefficients and the apparent ratio from the ground-based from AD-NET (the Asian Dust and aerosol lidar observation NETwork) data and the corresponding CALIOP spaceborne lidar data show similar trends. (5) During the dust process, the concentration of particulate matter increased significantly. On May 12th, the mean values of PM_{2.5} and PM₁₀ were quite high in Gansu province, which reached 7 times and 12 times respectively of the national first-level standard, and on May 14th. And the ratio of PM₁₀ and PM_{2.5} reach above 6 in many places in Gansu and Xinjiang province. (6) Due to the low trough in the west of Inner Mongolia deepens and extends to east, and the South Asia High move steadily southward, bring the cold air southward. On May 14th, the instability stratification strengthened, leading to the outbreak of dust weather.

Key Words: lidar; dust aerosol; optical property; color ratio; particle matter

0 引言

气溶胶是影响地球辐射收支平衡的主要因子之一,气溶胶通过吸收和散射作用直接改变地表辐射平衡(Twomey, 1977),即“阳伞效应”;另外,气溶胶也可以作为云凝结核参与云微物理过程,间接影响天气过程,称为“间接效应”(Albrecht, 1989)。IPCC 第五次评估报告指出,气溶胶部分抵消了混合温室气体的辐射强迫,是气候变化中最不确定的部分(张华等, 2014)。沙尘气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分,其主要成分为矿物气溶胶(车慧正等, 2005),与颗粒物浓度及空气质量密切相关(James et al., 2002; 王式功等, 2011; 石广玉等, 2018)。苏婧(2010)定量计算研究中国西北地区沙尘气溶胶辐射强迫作用,发现在地表沙尘气溶胶的辐射强迫出现很大的负值。张丁玲等(2012)的研究表明,沙尘气溶胶对青藏高原上空的云辐射强迫产生影响。

自 1993 年甘肃金昌发生特强沙尘暴后,国内关于沙尘天气的研究逐渐增多(钱正安等, 2002)。钱正安等(2007)对比分析了中国、美国 and 苏丹的强沙尘天气特征,得到中国西北

强沙尘天气的爆发是水汽条件差,以及地面冷锋共同作用的结果。西伯利亚上空干冷极地大陆性气团是否造成东西向风经过沙源区是导致中国春季沙尘暴是否多发的主要原因(柳中等, 2004),影响中国北方特强沙尘暴的环流系统主要包括纯强干冷峰型、蒙古气旋与干冷锋混合型、蒙古冷高压南部倒槽型和干飚线与冷锋混合型四种(刘景涛等, 2004)。除天气系统的影响之外,沙尘暴活动的频发与人类活动也密切相关(王涛等, 2001)。全球变暖的影响下,土地不合理利用导致沙尘天气频发(叶笃正等, 2000; 钱正安等, 2004, 2006)。19 世纪中期到 20 世纪初,中蒙地区的沙尘暴活动呈现波动变化的特征,并且中蒙中、东及西区三区系的变化完全不同,除此之外,沙尘粒子还具有重要的气候和环境效应(石广玉等, 2003)。

随着激光雷达技术的日渐成熟,利用激光雷达(包括地基和星载激光雷达)对沙尘气溶胶的研究也逐渐增多。利用星载激光雷达资料,可以反演得到大气中云和气溶胶的信息(Liu et al., 2008; Liu et al., 2008; Chen et al., 2010, 2014; Zhou et al., 2013; Liu et al., 2014; Huang et al., 2015)。有研究表明,大气中气溶胶的光学参数以及颗粒物浓度是边界层高度的函数(Nicolas et al., 2019)。此外,在水平尺度上,星载激光雷达还能够较好地反应沙尘气溶胶传输过程;在垂直方向上,能够反应沙尘气溶胶的辐射特性随高度变化的特征(陈勇航等, 2008, 2009)。如中国西北沙尘气溶胶在青藏高原的抬升作用下,借助西风急流传输至太平洋区域(Huang et al., 2008),夏季传输至中国东部的沙尘气溶胶中,13.4%通过高空跨越至北美地区(王文彩, 2013),从而对全球天气和气候产生影响。而利用日本葵花静止气象卫星发现,对于这种高海拔、远距离的沙尘传输,植树造林对空气质量改善的效果不大(Guo et al., 2019)。另外,基于星载激光雷达数据,结合气象要素和后向轨迹模型,可以有效判别大气中的气溶胶类型(陈晓磊等, 2018)。基于卫星数据和土地利用数据,第一次计算得到沙尘气溶胶中的人为排放占 25%,沙尘气溶胶的排放受气候变化影响,同时又会影响气候变化(Ginoux et al., 2001, 2012)。

除星载激光雷达外,利用地基激光雷达资料对于气溶胶的研究也有很多。Shimizu et al. (2004)等利用地基激光雷达在中国和日本的连续观测资料,发现北京地区的沙尘气溶胶多高达 4km,并且部分传输至日本福冈站点。东亚地区的自然沙尘气溶胶来源靠近城市和工业区,也是世界上人为气溶胶浓度最高的地区(Sugimoto et al., 2015)。祝存兄(2015)利用中国气象局南京综合观测基地的微脉冲激光雷达反演得到的消光系数和退偏比数据,监测到南京地区一次沙尘天气的爆发和消散动态。邓梅(2015)对北京地区沙尘天气下的退偏比等气溶胶光学参数进行分析,得到沙尘天气下,北京地区的气溶胶 Angstrom 指数平均值较小。高兴艾(2018)利用 SACOL 站点的双偏振激光雷达数据对气溶胶的退偏比等光学参数进行分析,发现沙尘天气期间吸收性气溶胶质量浓度显著增加,峰值出现在 8:00 和 20:00 左右。沙尘气溶胶在地中海西南部的传输过程中,气溶胶的散射特性以及 PM_{10} 浓度变化,受撒哈拉沙漠的沙尘气溶胶传输影响,在暖季,地中海地区气溶胶浓度较大(Nishizawa et al.,

2017)。除固定的地基雷达外,柴文轩等(2019)利用车载激光雷达对京津冀地区的沙尘气溶胶进行走航观测,实现对沙尘天气过程中各颗粒物的实时观测。范仕东(2018)利用船载激光雷达(搭载有一台双波长弹性散射偏振激光雷达)对上海至武汉长江流域上的大气颗粒物的分布进行研究,为多层次理解气溶胶污染提供了帮助。

现有的对于沙尘气溶胶的研究,多集中于单一的星载或地基激光雷达对沙尘天气过程中沙尘气溶胶的光学性质进行分析,本文同时利用了星载和地基激光雷达数据进行综合分析。首先,利用星载激光雷达 CALIOP 数据,分析了此次沙尘天气过程中气溶胶光学性质的垂直分布特征,以及沙尘气溶胶的时空分布和三维结构特征;并结合亚洲沙尘和气溶胶激光雷达观测网 AD-NET 的数据对传输至日韩等太平洋地区的沙尘进行分析和定量表述,同时比较和分析了星载激光雷达 CALIOP 和地基激光雷达的表观散射比;另外,利用欧洲中心提供的气象要素数据分析了沙尘天气成因,利用国家环保局提供的空气质量数据分析了此次沙尘天气过程对空气质量的影响。

1 数据和方法

1.1 数据

1.1.1 卫星数据

1998 年,美国宇航局与法国国家空间研究中心合作开始实施“云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测”(Cloud-Aerosols Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, CALIPSO)计划,CALIPSO 卫星搭载的正交偏振云-气溶胶偏振雷达 CALIOP 是世界上首个应用型的星载云和气溶胶激光雷达,具有三个接收通道(1064nm 波长、532nm 波长垂直及平行通道)。CALIOP 采用 Nd: YAG 激光器,能够同时发射 532nm 波长和 1064nm 波长的激光脉冲,其脉冲能量均约为 110mJ,重复频率为 20.16Hz(Winker et al., 2004, 2007)。

本文使用的是 CALIOP Level 1 提供的 532nm 波长总衰减后向散射系数、532nm 波长平行通道的衰减后向散射系数和 1064nm 波长衰减后向散射系数,Level 2 的垂直特征层分布产品和 5km 分辨率的气溶胶廓线产品。其中 Level 1 数据在海平面至 8km 的高度上,水平分辨率均为 333m,532nm 波长和 1064nm 波长数据的垂直分辨率分别为 30m 和 60m。

1.1.2 空气质量数据

2013 年起,国家环保部在实施《环境空气质量标准》(GB3095-2012)后,在其官方网站公布了 90 余城市的包括 PM_{2.5}、PM₁₀ 在内的空气质量数据。

本文采用了 O₃、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、AQI、CO 等七个指标的空气质量数据。

1.1.3 中国地面气象站逐小时观测资料

中国国家级地面站小时观测数据包括包括气温、气压、相对湿度、水汽压、风、降水量等要素,所有数据均经过质量控制。

本文使用的是国家气象信息中心提供的小时天气现象观测数据。

1.1.4 ERA-Interim 数据

基于 2006 年发布的集成预报系统 IFS (Integrated Forecasting System)，发展了生成 ERA-Interim 数据的资料同化系统。ERA-Interim 数据提供了 1979 年至 2019 年 8 月 31 日的全球大气数据，数据分为再分析数据和预测数据，其中前者时间间隔为 6 小时，后者为 3 小时。

本文采用的数据为海平面、850hPa 和 500hPa 高度的全球再分析大气数据，数据空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

1.1.5 AD-Net 数据

(AD-Net) 激光雷达网是世界气象组织 WMO (World Meteorological Organization) 全球大气观测计划 GAWIP (Global Atmosphere Watch Implementation Plan) 的亚洲观测部分 (Sugimoto et al., 2008)。其主要目的是实现对亚洲沙尘气溶胶和其他类型气溶胶的连续观测，用于研究气溶胶对东亚环境的影响。观测网的激光雷达主要采用 Nd: YAG 激光器，其脉冲能量为 20mJ，重复频率为 10Hz。

本文采用了 AD-NET 提供的 532nm 波长和 1064nm 波长后向散射系数数据和气溶胶消光数据，用于分析地基站点沙尘气溶胶的垂直分布特征以及与星载激光雷达数据的对比验证。

1.2 HYSPLIT 轨迹模型

HYSPLIT 模型是由美国国家大气海洋管理局开发的用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。模型主要通过输入气象要素场以获取污染物在全球的输送和扩散方式。

本文使用 HYSPLIT 输入的初始场为美国国家环境预报中心的全球资料同化系统的小时气象要素数据。

2 结果与分析

2.1 CALIOP 激光雷达数据分析

利用 CALIOP Level 1B 数据中提供的 532nm 波长总衰减后向散射系数 $\beta_{532total}$ ，532nm 波长垂直衰减后向散射系数 $\beta_{532\perp}$ ，1064nm 波长衰减后向散射系数 β_{1064} ，其单位均为 $\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。通过公式

$$\beta_{532//}(z) = \beta_{532total}(z) - \beta_{532\perp}(z) \quad (1)$$

$$VDR = \frac{\beta_{532\perp}(z)}{\beta_{532//}(z)} \quad (2)$$

$$CR = \frac{\beta_{1064}(z)}{\beta_{532total}(z)} \quad (3)$$

可以计算得到 532nm 波长平行通道的衰减后向散射系数 $\beta_{532//}$ 和表征气溶胶粒子光学特性的体积退偏比和色比，式中，VDR（532 Volume Depolarization Ratio）表示 532nm 波长退偏比，CR（Color Ratio）表示色比，一般来说，将衰减后向散射系数位于 $0.0008-0.0045\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的颗粒判断为气溶胶（Omar et al., 2009; Mielonen et al., 2009）；体积退偏比用于表征粒子的非球形程度，体积退偏比较大的粒子通常认为是沙尘、海盐气溶胶以及冰云，因此，通常将位于内陆地区，存在的高度较低且退偏比较大的气溶胶判断为沙尘；色比则用于表示粒子大小，其值越大，粒子越大。

对 CALIOP 数据进行水平方向 3km、垂直方向 1km 的平滑处理以减小星载激光雷达的信号噪声。通过处理后的 532nm 波长衰减后向散射系数、体积退偏比和色比，可以对此沙尘天气中气溶胶的光学特性以及垂直分布进行分析。如图 1，给出了 2019 年 5 月 10 日、5 月 12 日至 16 日（文中使用的时间均为世界时）532nm 波长总衰减后向散射系数、体积退偏比和色比的分布图。5 月 10 日，在新疆哈密、敦煌和青海省中部地区，有明显的高浓度沙尘气溶胶粒子存在，主要存在于地表至 6km 的较低高度上，衰减后向散射系数平均值为 $0.0024\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，体积退偏比平均值为 0.22，色比平均值为 1.30；12 日，沙尘气溶胶进一步向东传输，在内蒙古西部和甘肃省北部地区，探测到少量沙尘气溶胶，在传输过程中，退偏比和色比值分别减小 31.59% 和 2.35%。13 日至 16 日为第二次东向传输过程，13 日，在新疆、甘肃北部和青海东部地区地面到 7km 的高度上探测到更深厚的沙尘气溶胶粒子，532nm 波长衰减后向散射系数、体积退偏比和色比平均值分别为 $0.0023\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 、0.25、1.31；14 日，内蒙古中部探测到的沙尘气溶胶粒子的体积退偏比减少 5.65%，色比减小 5.58%；15 日，在地面至 4km 高度的东北地区探测到的沙尘气溶胶粒子的退偏比和色比值与 13 日相比分别增加了 20.18% 和 5.51%；16 日在日本中部地区，显示出较高浓度的沙尘气溶胶粒子，退偏比在 0.1-0.3 之间，平均值为 0.14；色比在 0.6-2.0 之间，平均值为 1.29。可以看到，这些沙尘气溶胶粒子有明显的向东传输。

在 10 日至 12 日有第一次小范围东向传输，在内蒙古中部和甘肃省地区探测到沙尘气溶胶，沙尘气溶胶在传输过程中体积减小；13 日至 16 日的东向传输过程中，14 日，在内蒙古中部探测到沙尘气溶胶，15 日，沙尘气溶胶在经过沙源蒙古中部戈壁后，在东北地区探测到的沙尘气溶胶粒子变大，与 14 日相比，色比值增加 5.51%。16 日，在太平洋地区的日本中部，探测到明显沙尘气溶胶。

图 2 给出了图 1 对应地区的垂直剖面图。5 月 10 日，在新疆北部区域 2km 至 6km 的高度上以纯沙尘气溶胶为主，在青海省中部地表至 6km 的高度上存在显著沙尘气溶胶，同时均伴随有少量的污染沙尘气溶胶；而 12 日，蒙古西侧、甘肃省北部至青海中东部地区，探测到大范围纯沙尘气溶胶，其高度仍然分布在地表至 6km 范围内；在 13 日至 16 日，气溶胶进一步向东传输。在 13 日，内蒙古呼伦贝尔地区自地表至 6km 有显著沙尘气溶胶存在，同时，在内蒙古锡林郭勒至山西区域，地表至 4km 高度有明显沙尘气溶胶存在，其高度较

低；14 日，探测到的沙尘气溶胶显著减少，在吉林延边区域低层探测到多种类型气溶胶的混合物，在高层，则以纯沙尘气溶胶为主，低层则以污染沙尘气溶胶为主；15 日，甘肃北部酒泉至青海东部地区，地表至 8km 高度上均存在大量纯沙尘气溶胶，同时在东北吉林地区近地面也探测到显著沙尘气溶胶；16 日，在西风急流的带动下，日本北海道西侧海洋，日本海至冈山区域 2km 至 6km 的高度上有显著沙尘气溶胶，而在地表至 2km 的高度，主要以清洁海洋型气溶胶为主，清洁大陆型和其他类型的混合物次之。与图 2 得到的结论一致。

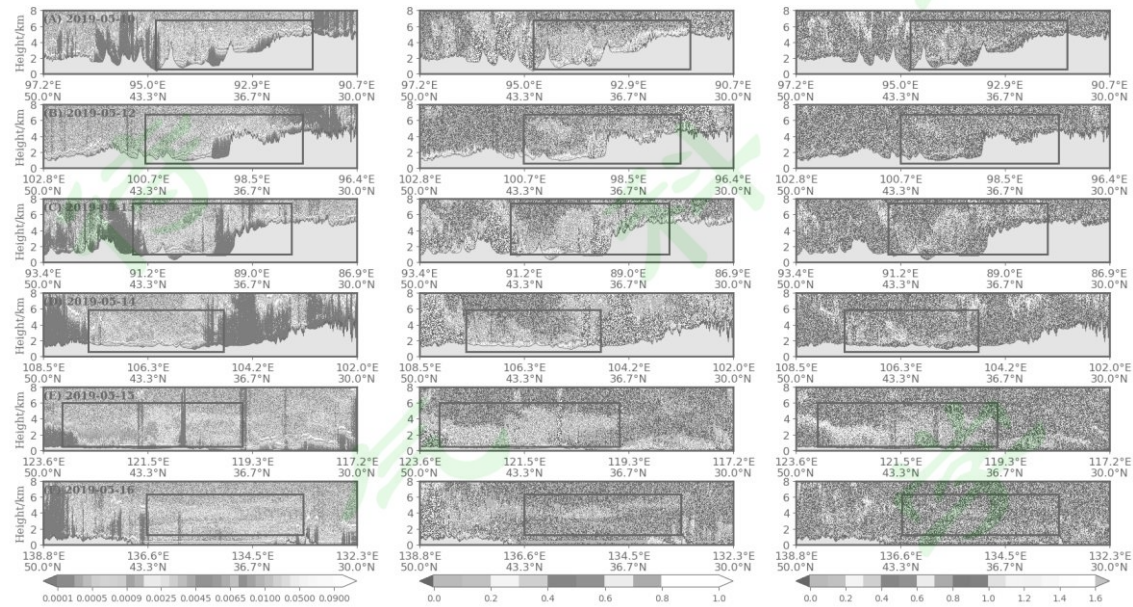


图1 2019 年 5 月 10 日 (A)、5 月 12 日至 16 日 (B) - (F)，CALIOP 的 532nm 波长总衰减后向散射系数（第一列）、体积退偏比（第二列）和色比（第三列）的垂直剖面图

（黑色实线代表地表高度，图中从上至下每一列黑色矩形框划出的区域分别为新疆哈密、敦煌和青海省中部，内蒙古西部和甘肃省北部，新疆、甘肃北部和青海东部，内蒙古中部，东北地区，太平洋地区）

Fig.1 Vertical distributions of the 532nm total attenuation backscatter coefficient (column 1), volume depolarization ratio (column 2), and color ratio (column 3) from CALIOP on May 10th (A), May 12th to 16th in 2019 (B)-(F). (Black line shows the surface elevation, and the areas in the black rectangles from top to bottom in each column are Hami, Dunhuang and the central Qinghai Province, western Inner Mongolia and northern Gansu Province, Xinjiang Province, northern Gansu Province and eastern Qinghai Province, central Inner Mongolia, northeast China, and the Pacific Ocean respectively)

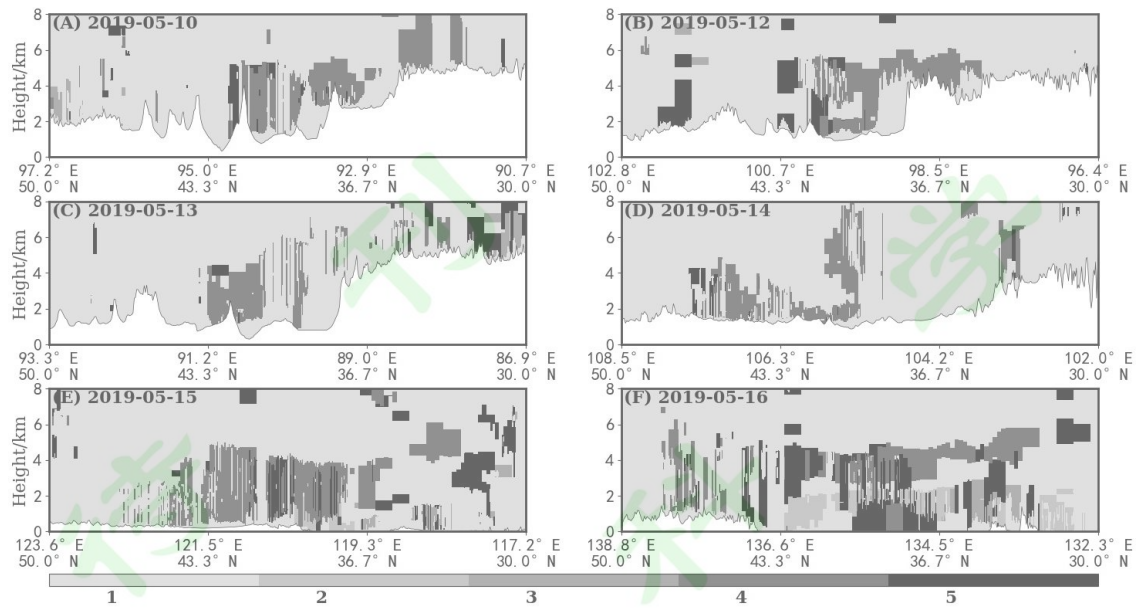


图2 2019年5月10日(A)、5月12日至16日(B)-(F), CALIOP 气溶胶类型的垂直剖面(图例中 1=未确定, 2=海洋型, 3=大陆型, 4=纯沙尘, 5=污染沙尘, 黑色实线代表地表高度)

Fig.2 Vertical distribution of aerosol type from CALIOP on May 10th (A), May 12th to 16th in 2019 (B)-(F), (1=not determined, 2=marine, 3=continental, 4=pure dust, 5=polluted dust, black line shows the surface elevation)

2.2 地基激光雷达数据分析与对比

AD-NET 地基激光雷达数据垂直分辨率为 6m, 时间分辨率为 15min, 探测高度为地面至 18km。主要数据包括 1064nm 波长和 532nm 波长处的衰减后向散射系数和 532nm 波长的体积退偏比, 衍生数据还包括球形粒子以及沙尘气溶胶的消光系数。

为比较 AD-NET 数据和 CALIOP 数据对于特征层识别的准确性, 通过筛选, 在沙尘天气前后, 得到一条距离 AD-NET 地基激光雷达站点仅 33km 的一条轨迹, 过境时间为 5 月 10 日 4 时 17 分(如图 3), 该地基激光雷达站点为日本长崎站点。同时, 选取了距离长崎站点较近的韩国济州岛站点, 站点距离为 358km, 以比较两个站点沙尘气溶胶对总的气溶胶贡献的差异。

CALIOP 数据在白天信噪比较低, 因此对 CALIOP 观测得到的 532nm 波长衰减后向散射系数进行水平方向 10 点平滑, 即 3km 平均, 和垂直方向上 1km 的平滑处理。由于地基激光雷达数据本身为 15 分钟的平均值, 因此, 仅对其在水平方向上三点平滑, 即 45min 平均, 垂直方向上做 1km 平滑处理。

为消除星载和地基激光雷达之间不同的大气分子透射效应带来的差异, 利用 Kim et al. (2008) 提出的表观散射比 R_{app} (Apparent scattering ratio) 进行比较, 公式表示为

$$R_{app}(z) = \frac{\beta(z)}{\beta_{mol}(z)} \exp\left(-2 \int_{z_{ref}}^z \alpha_{aer}(z') dz'\right) \quad (4)$$

式中, $\beta(z)$ 为高度 z 上大气的后向散射系数, z_{ref} 为瑞利散射高度, 即 $R_{app}(z_{ref})$ 等于 1, α_{aer} 为气溶胶和云粒子的消光系数。 R_{app} 只与大气气溶胶和云粒子有关, 可以消除星载和地基激

光雷达之间不同的大气分子透射效应带来的差异。

气溶胶和云层约束的时空变异性使 CALIOP 产品的验证与地面站仪器的直接比较变得非常复杂。通过公式（3）计算得到只与气溶胶和云粒子有关的表现散射比 R_{app} ，以在比较两种数据时，消除星载和地基激光雷达之间不同的大气分子透射效应带来的差异。

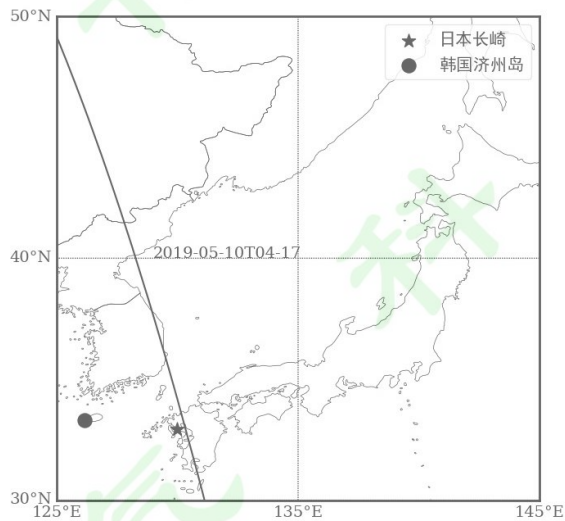


图 3 CALIPSO 卫星经过日本地基雷达站点长崎的轨迹

（五角星标记为长崎站点，实心圆标记为匹配到的最近的韩国站点）

Fig.3 Tracks of CALIPSO satellite passing over the Nagasaki ground-based lidar stations in Japan.

(The star represents the Nagasaki station, and the filled circle shows the nearest station in Korea to Nagasaki)

图 4 显示了 CALIPSO 卫星与长崎站点地基激光雷达的 532nm 波长退偏比值以及表现散射比的对比。2019 年 5 月 10 日，CALIPSO 在地面的轨迹距离长崎站点最近距离为 33km。CALIOP 数据和地基激光雷达的衰减后向散射数据廓线均在 6km 高度上均探测到云的存在，如图（A）、（B），同时 CALIOP 探测到的云顶高度更高，AD-NET 地基激光雷达探测到的云底高度更低。图（C）中的衰减后向散射系数廓线同样显示出这一信息。地基激光雷达在卫星过境前 8km 至 9km 的高度上，探测到气溶胶粒子或薄云，在计算得到的表现散射比数据中，可以在 8km 至 9km 高度看到数据峰值。

总体来说，CALIOP 和地基激光雷达在探测到特征层，如气溶胶、云时，会显示出较为一致的结果，同时，两种数据在比较只与气溶胶粒子和云有关的表现散射比时，都很好的探测到了特征层，地基激光雷达探测到的特征层底部高度更低，星载激光雷达探测到的特征层顶部高度更高。

图 5 为 5 月 13 日至 5 月 19 日在济州岛站点和日本长崎站点的气溶胶光学参数时间变化序列，包括 532nm 波长衰减后向散射系数、1064nm 波长衰减后向散射系数、体积退偏比、沙尘消光系数和球形粒子消光系数。左列表示日本长崎站点，右列为行济州岛站点，两个站点相距 358km，站点海拔高度接近。图 5 左列也可以明显看出，5 月 15 日和 5 月 16 日，在日本长崎站点，探测到较大的衰减后向散射系数和体积退偏比，而其二级产品沙尘和球形粒

子消光系数，也显示出较大值，即探测到了沙尘气溶胶的存在。济州岛站点除 5 月 16 日为部分数据缺测外，可以看到，5 月 13 日和 15 日期间，济州岛站点 532nm 波长和 1064nm 波长衰减后向散射系数较大，并且高度也较高，位于 5km 至 9km。16 日之后，大值区域的高度逐渐降低。图 5（右 C）也显示，在 13 日和 14 日济州岛站点的 6km 至 9km 高度，532nm 波长体积退偏比较大，对应球形粒子的消光系数也较大，同时反演得到的图 5（右 D）中的沙尘消光系数，在 13 日 3km 至 5km 高度，也明显高于前后日期的消光系数。

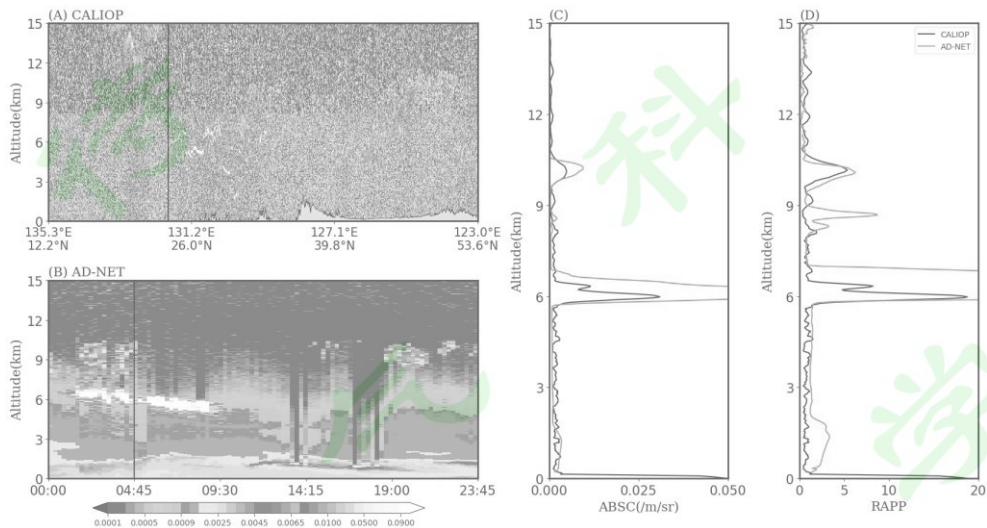


图 4 2019 年 5 月 10 日 CALIOP 和日本长崎地基激光雷达数据衰减后向散射系数 (C) 和表观散射比 (D) 的比较, (A) 中的实线表示 CALIPSO 卫星轨迹距离长崎站点最近的位置,

(B) 中的实线表示 CALIPSO 卫星过境时间 (图中黑色和红色实线分别表示地基和星载激光雷达数据)

Fig.4 Comparison of the attenuated backscatter coefficient (C) and the apparent scattering ratio (D) between CALIOP and the ground-based lidar in Nagasaki on May 14th 2019
(the solid black line in (A) and (B) shows the nearest position against the Nagasaki station and the closest time to the CALIPSO transit time, respectively.

The black and red solid lines in (C) and (D) represent the AD-NET and CALIOP respectively.)



图5 地基激光雷达站点长崎（左）和济州岛（右）的 532nm 波长衰减后向散射系数（A）、1064nm 波长衰减后向散射系数（B）、532nm 波长体积退偏比（C）、沙尘粒子消光系数（D）和球形粒子消光系数（E）
（日本长崎站点，海拔高度 0.206km；韩国济州岛站点，海拔高度 0.035km）

Fig.5 Vertical distributions of the attenuated backscatter coefficient at 532nm (A), the attenuation coefficient at 1064nm (B), the volume depolarization ratio at 532nm (C), the dust extinction coefficient (D), the sphere extinction coefficient (E) at the Nagasaki station in Japan (left) and Jeju station in Korea (right)
(The altitudes of Nagasaki station and Jeju station are 0.206km and 0.035km respectively)

图6的5月15日的96h后向轨迹显示，在5km至6km的高度，影响日本长崎站点和韩国济州岛站点的气团主要经过新疆、甘肃以及内蒙古等沙尘源地，与图5中得到的，这两个站点在5km及以上的高度上均探测到沙尘气溶胶的存在相一致。而影响这两个站点1km一下的气团主要源于其周边的太平洋海域，同时图5（E）显示，在0-1km球形粒子消光系数较大，即在长崎和济州岛站点较低层为海洋性气溶胶。

为定量描述此次沙尘天气对太平洋地区的影响，利用地基激光雷达数据中的沙尘气溶胶消光系数和总的气溶胶消光系数，计算沙尘气溶胶占总气溶胶的比例。如图7，在5月13日至17日，从整体趋势来看，日本长崎站点和韩国济州岛站点沙尘气溶胶所占比重的变化具有相同的趋势，而5月17日对应为此次沙尘天气过程基本结束的日期。对比两个站点，从整体趋势和日平均比值来看，长崎站点沙尘气溶胶所占比重更大，其均值为42.16%，韩国济州岛站点为39.25%。受此次沙尘天气过程影响，在5月16日、17日，长崎站点沙尘比重显著增大。

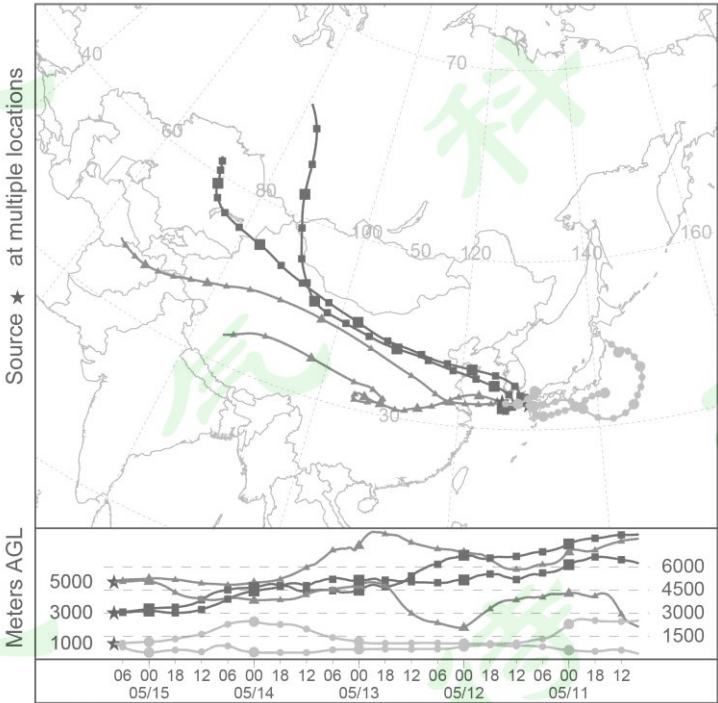


图6 2019年5月15日1km至6km长崎和济州岛站点后向轨迹分布

Fig.6 Distribution of back trajectories from 1km to 6km in Nagasaki and Jeju station on 15th May, 2019

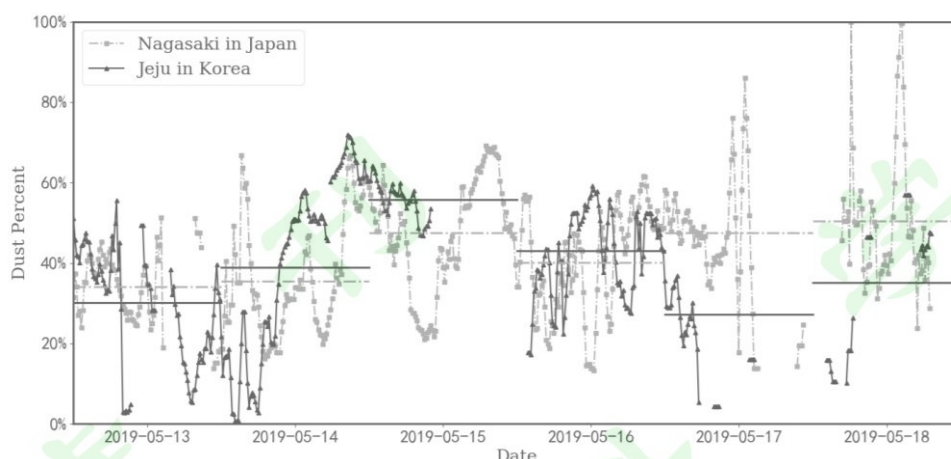


图7 地基激光雷达站点长崎（矩形虚线）和济州岛（三角形实线）探测到的沙尘占总气溶胶的比值，虚线分别代表对应站点的日平均占比

Fig.7 Percentages of dust detected by the ground-based lidar in Nagasaki (square dotted line) and Jeju (triangle solid line) station, the dashed line shows the daily mean dust percentage respectively at these two stations

2.3 沙尘天气对空气质量的影响

此次沙尘天气爆发原因，主要是受地面冷锋和蒙古气旋的共同影响。沙尘源区主要是蒙古国南部和南疆盆地。此次沙尘天气对中国西北、华北和东北等地的空气质量影响很大，颗粒物浓度，尤其是 PM_{10} 浓度显著增加。5月9日，在新疆库尔勒地区的 PM_{10} 浓度达到 $420 \mu g/m^3$ ，10日，兰州市气象台发布霜冻蓝色预警；11日，内蒙古中部、宁夏、甘肃省东北部、山西北部、河北省西北部等地均出现了7-8级阵风，局地9-10级，并且新疆北部、甘肃中东部和内蒙古中西部降温均超过 $6^\circ C$ ，最高降温 $16^\circ C$ 。

从 PM_{10} 的浓度分布（图8）也可以看出，5月10日， PM_{10} 浓度在甘肃省大部分地区以及新疆吐鲁番、哈密等地区浓度达到 $400 \mu g/m^3$ 以上；11日， PM_{10} 浓度显著增长，在甘肃省临夏市突破1000，达到 $1148 \mu g/m^3$ ，全国 PM_{10} 大值出现在甘肃省、青海省和宁夏，且均超过 $600 \mu g/m^3$ ；12日， PM_{10} 浓度最大值仍然在甘肃省临夏市，为 $673 \mu g/m^3$ ；次大值出现在青海省海东市和西宁市，分别为 $611 \mu g/m^3$ 和 $579 \mu g/m^3$ ；13日， PM_{10} 浓度在全国范围内有所下降，最大值仍在甘肃省境内。酒泉市最大值 $332 \mu g/m^3$ ；14日，西北地区 PM_{10} 浓度又开始增加，最大值出现在甘肃省武威市， $1596 \mu g/m^3$ ，是此次沙尘天气过程中出现的最大值；另外，甘肃省白银市达到 $1375 \mu g/m^3$ ；甘肃省金昌市达到 $1366 \mu g/m^3$ ；甘肃省张掖市 $1181 \mu g/m^3$ ，均超过1000。15日， PM_{10} 浓度在全国范围内再一次下降，最大值依旧位于甘肃省境内。甘肃省金昌市 PM_{10} 浓度最大，为 $461 \mu g/m^3$ 。

$PM_{10}/PM_{2.5}$ 可以表示颗粒物中粗粒子所占比例，5月10日， $PM_{10}/PM_{2.5}$ 比值在甘肃省酒泉市达到最大值9.5，新疆塔城、克拉玛依和甘肃嘉峪关的浓度达到6.5以上；11日和12日， $PM_{10}/PM_{2.5}$ 最大值均出现在新疆塔城；13日，甘肃省酒泉市 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 比值最大，达到6.14；14日，新疆博州比值最大，为7.89；15日，大值逐渐东移，在内蒙古呼伦贝尔获得最大值7.45。5月10日至15日，大气中粗粒子占比较高，即大气污染物主要是沙尘气溶

胶。

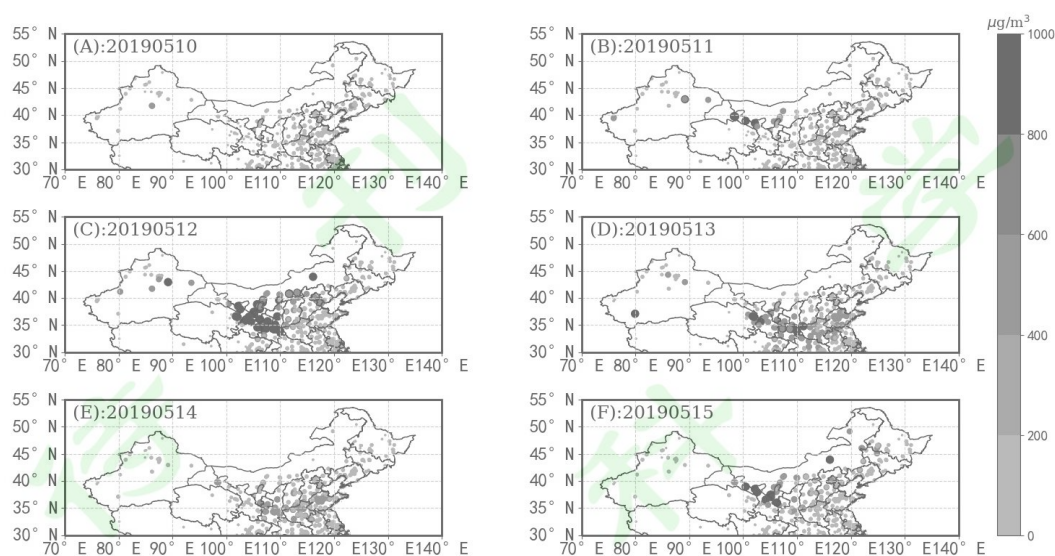


图 8 2019 年 5 月 10 日至 15 日 PM_{10} 的分布

Fig.8 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ from May 10th to May 15th, 2019

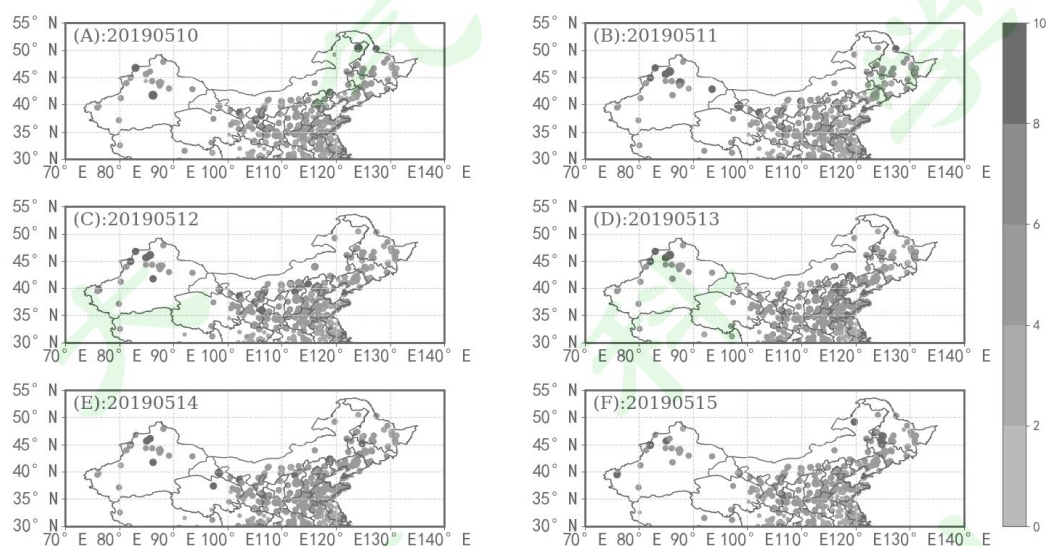


图 9 2019 年 5 月 10 日至 15 日 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 的分布

Fig.9 Spatial distribution of $PM_{10}/PM_{2.5}$ from May 10th to May 15th, 2019

2.4 天气形势分析

从海平面气压场来看（图 10），在 5 月 10 日至 12 日，中国北部盛行西风，污染物主要在西风作用下向东传输。11 日，内蒙古中部地区有一地面风场辐合线，在辐合线南侧的甘肃北部、内蒙古西部地区，出现沙尘暴天气。12 日至 13 日，中国北部地区地面风速逐渐降低，在蒙古地区出现低压。14 日，低压中心南下，并且东移，中国北部在西北气流的影响下，再一次爆发沙尘天气，此次沙尘源地是新疆、宁夏地区。15 日，低压中心移动到东北地区，地面较大风速与之配合，使得来自内蒙的沙尘南下，在东北爆发沙尘暴天气。

图 10 中的沙尘天气显示，5 月 10 日至 5 月 12 日，第一次沙尘东移过程显著，从新疆

地区经北部路线传输至内蒙古中部和东部地区。5月13日至15日，第二次沙尘爆发，此次传输路径偏南，影响中国甘肃、陕西等地。

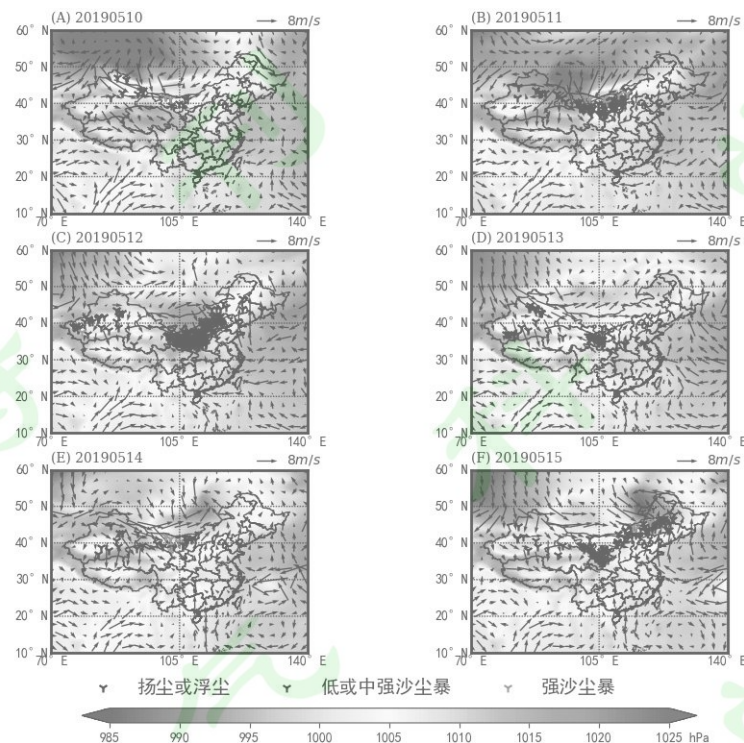


图 10 2019 年 5 月 10 日至 15 日 12:00 的海平面气压场（填色），风场（箭头）
和中国气象局观测到的沙尘天气（图例）

Fig.10 Surface pressure field (contour), wind field (arrows) at 12:00 from May 10th to May 15th, 2019
and the sandstorm weather (legend)observed by the Chinese Meteorology Agency (CMA)

从 12 时 750hPa 位势高度场和风场来看（图 11），10 日，在新疆北部、甘肃等地区风速达到 30m/s，有利于将沙尘气溶胶从沙尘源地传输至下游地区；11 日，沙尘气溶胶传输到达内蒙古、东北区域；12 日至 13 日，在 750hPa 位势高度场上，中国北方大部分地区盛行西风，使得沙尘气溶胶进一步向东传输，影响太平洋地区，同时在 13 日，在新疆、甘肃和内蒙交界处，出现一个小的低压中心；14 日开始，低压中心加深东移，在内蒙古北部形成一更深厚的低压中心，从新疆西部向甘肃省北部、内蒙古中部逐渐东移，直至 15 日转移至黑龙江省西部，在整个过程中，主导冷空气逐步南下，使得甘肃省北部、内蒙古西部爆发沙尘暴天气。

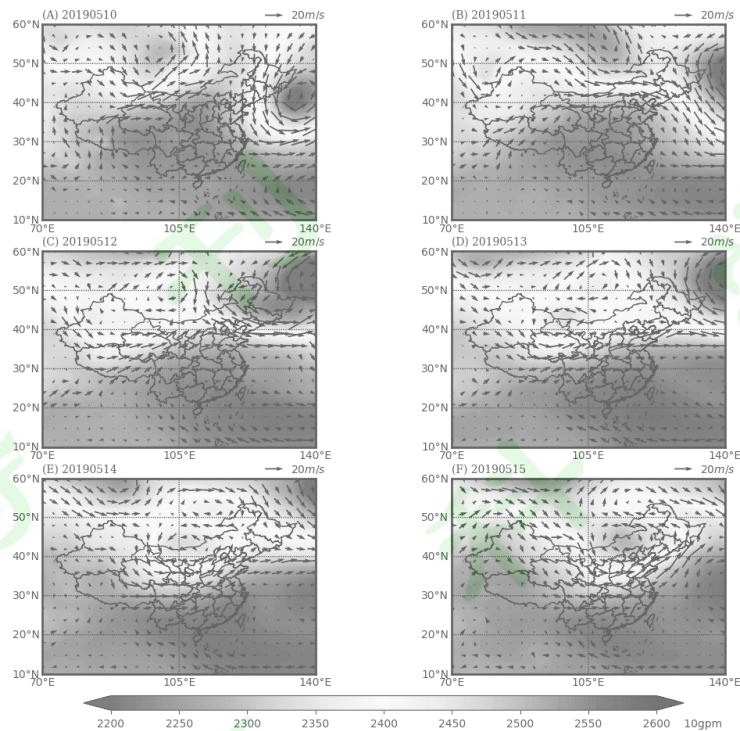


图 11 2019 年 5 月 11 日至 15 日 12:00 的 750hPa 位势高度场（填色）和风场（箭头）

Fig.11 Air pressure field (contour) and wind field (arrows) at 750hPa at 12:00

from May 10th to May 15th, 2019

3 结论

通过 CALIOP 星载激光雷达观测到，在 2019 年 5 月 10 日至 16 日，有两次沙尘天气过程。第一次为 10 日至 12 日的小范围东向传输过程，从新疆地区传输至内蒙古中部地区，沙尘气溶胶在传输过程中退偏比和色比值分别减小 31.59% 和 2.35%；13 日至 16 日为第二次东向传输过程，从新疆地区、内蒙古中部，至东北吉林地区，最后到达日本中部，退偏比和色比平均值分别达到 0.31 和 1.39。

星载激光雷达和 AD-NET 地基激光雷达数据的对比显示，两种数据在特征层识别方面具有一致性。通过亚洲沙尘观测网 AD-NET 地基激光雷达探测到的数据，证明沙尘气溶胶存在于日本和韩国的多个站点。通过日本长崎站点和韩国济州岛站点地基激光雷达数据，计算得到沙尘气溶胶消光系数对总气溶胶消光系数的贡献分别为 42.16% 和 39.25%。

此次沙尘天气过程对我国北方空气质量，特别是 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ ，产生很大的影响。特别是对甘肃省地区，临夏市在 5 月 11 日， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度分别超过国家一级浓度标准的 11 倍和 4 倍；之后内蒙古西部的小槽的加深以及南压，使得西北冷空气稳定南下，14 日不稳定层结加深导致沙尘天气再一次爆发，甘肃境内最大 PM_{10} 浓度和 $PM_{2.5}$ 浓度分别达到国家一级标准的 32 倍和 9 倍。

致谢：感谢国家气象信息中心提供的小时天气现象观测数据，感谢中国气象局提供的空气质量数据，感谢 CALIPSO 科学团队提供的数据产品，感谢 AD-NET 团队提供的地基激光雷

达数据,感谢欧洲中心提供的 ERA-interim 再分析数据,感谢美国国家海洋与大气局开发的 HYSPLIT 后向轨迹模式。

参考文献

- Albercht B, 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245, 1227-1230. doi:10.1126/science.245.4923.1227
- Bishop J K, Davis R E, Sherman J T, et al. 2002. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific [J]. *Science*, 298 (5594): 817-821. doi:10.1126/science.1074961
- 柴文轩, 唐桂刚, 王帅, 等. 2019. 京津冀地区一次浮尘过程的车载激光雷达走航观测 [J]. *中国环境监测*, 35(3): 138-145. Chai W X, Tang G G, Wang S, et al. 2019. Analysis of an air pollution of dust process using mobile lidar over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Environmental Monitoring in China (in Chinese)*, 35 (3): 138-145. doi:10.19316/j.issn.1002-6002.2019.03.18
- 车慧正, 张小曳, 石广玉, 等. 2005. 沙尘和灰霾天气下毛乌素沙漠地区大气气溶胶的光学特征 [J]. *中国粉体技术*, 3:4-7. Che H Z, Zhang X Y, Shi G Y, et al. 2005. Aerosol optical characteristics in Mu Us desert under weather conditions of dust storm and haze [J]. *China Powder Science and Technology (in Chinese)*, 3:4-7. doi:10.3969/j.issn.1008-5548.2005.03.002
- Chen B, Huang J, Minnis P, et al. 2010. Detection of dust aerosol by combining CALIPSO active lidar and passive IIR measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10 (9): 4241-4251. doi:10.5194/acp-10-5359-2010
- Chen B, Zhang P, Zhang B, et al. 2014. An overview of passive and active dust detection methods using satellite measurements [J]. *Journal of meteorological research*, 28(6): 1029-1040. doi:10.1007/s13351-014-4023-5
- 陈晓磊, 金莲姬. 2018. 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*, 55(002): 95-101. Chen X L, Jin L J. 2018. Vertical distribution characteristics of aerosols in different weathers based on CALIPSO satellite [J]. *Laser and Optoelectronics Progress (in Chinese)*, 55(002): 95-101. doi:10.3788/LOP55.020101
- 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 2008. 利用 CALIPSO 星载激光雷达资料跟踪分析一次远程沙尘输送过程[C]//长三角气象科技论坛论文集. 上海: 长三角气象科技论坛, 546-551. Chen Y H, Mao X Q, Huang J P, et al. 2008. Analysis of a long-distance transport of dust with CALIPSO [C]//*Proceedings of the Yangtze river delta meteorological science and technology forum*. Shanghai: Yangtze river delta meteorological science and technology forum (in Chinese), 546-551.
- 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 2009. 一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究 [J]. *中国环境科学*, 29 (5): 449-454. Chen Y H, Mao X Q, Huang J P, et al. 2009. Vertical distribution characteristics of aerosol during a long-distance transport of heavy dust pollution [J]. *China Environment Science (in Chinese)*, 29 (5): 449-454. doi: CNKI:SUN:ZGHJ.0.2009-05-002
- 邓梅. 2015. 基于卫星和 AERONET 观测的北京地区气溶胶光学特性研究 [D]. 安徽农业大学资源与环境学院硕士学位论文. Deng M. 2015. Research on aerosol optical properties in Beijing by using satellite and AERONET observation data [D]. M.S.thesis (in Chinese), School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University.
- 范仕东. 2018. 基于船载激光雷达的大气颗粒物分布研究 [D]. 中国科学技术大学地球与空间科学学院硕士学位论文. Fan S D. 2018. Investigation of distribution of atmospheric particles based on ship-borne lidar [D]. M.S.thesis (in Chinese), School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China.
- 高兴艾. 2018. 利用地基观测资料研究兰州郊区气溶胶光学性质 [D]. 兰州大学大气科学学院硕士学位论文. Gao X A. 2018. Study of aerosol optical properties in Lanzhou suburb using ground observation data [D]. M. S. thesis (in Chinese), College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University.
- Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART

- model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 106(17): 20255-20273. doi: 10.1029/2000jd000053
- Ginoux P, Prospero J M, Gill T E, et al. 2012. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products [J]. *Reviews of Geophysics*, 50(3). doi: 10.1029/2012RG000388
- Guo P, Yu S, Wang L, et al. 2019. High-altitude and long-range transport of aerosols causing regional severe haze during extreme dust storms explains why afforestation does not prevent storms [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 17(3): 1333-1340. doi: 10.1007/s10311-019-00858-0
- Huang J, Minnis P, Yan H, et al. 2010. Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10 (14): 6863-6872. doi: 10.5194/acp-10-6863-2010
- Huang J , Liu J , Chen B , et al. 2015. Detection of anthropogenic dust using CALIPSO lidar measurements [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 15(20): 11653-11665. doi: 10.5194/acp-15-11653-2015
- Huang J, Minnis P, Chen B, et al. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008. doi:10.1029/2008jd010620
- Kim S, Berthier S, Chazette P, et al. 2008. Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using Seoul National University ground-based lidar [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(4): 11207-11222. doi: 10.5194/acp-8-3705-2008
- Liu D, Wang Z E, Liu Z Y, et al. 2008. A height resolved global view of dust aerosols from the first year calipso lidar measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(D16), D16214. doi:10.1029/2007jd009776
- Liu J, Chen B, Huang J, et al. Discrimination and validation of clouds and dust aerosol layers over the Sahara desert with combined CALIOP and IIR measurements [J]. *Journal of meteorological research*, 2014, 28 (2): 185-198. doi: 10.1007/s13351-014-3051-5
- 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 2004. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究 [J]. *高原气象*, 23 (4): 540-547. Liu J T, Qian Z A, Jiang X G, et al. 2004. A study on weather types of super severe dust storms in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (4): 540-547. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2004.04.019
- 柳中明, 钱正安, 刘景涛, 等. 2004. 强与特强沙尘暴多发年与少发年春季气候特徵差异 [J]. *干旱区资源与环境*, 18 (1): 52-59. Liu Z M, Qian Z A, Liu J T, et al. 2004. Differences within frequent and rare years with strong and extremely strong sandstorms in Spring [J]. 2004. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 18 (1): 52-59. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2004.s1.009
- 刘贞, 张雪姣, 郑有飞, 等. 2016. 基于 CALIPSO 对中国春季一次沙尘暴的研究 [J]. *环境科学学报*, 36 (12): 4315-4327. Liu Z, Zhang Z J, Zhen Y F, et al. Spatio-temporal distribution and transport behavior of a dust event based on the CALIPSO in China [J]. *Acta Science Circumstantiae (in Chinese)*, 36 (12): 4315-4327. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0689
- Mielonen T, Arola A, Komppula M, et al. 2009. Comparison of CALIOP level 2 aerosol subtypes to aerosol types derived from AERONET inversion data [J]. *Geophysical Research Letters*, 36(18). doi:10.1029/2009GL039609
- Nicolas J F, Castaner R, Galindo N, et al. 2009. Analysis of aerosol scattering properties and PM₁₀ concentrations at a mountain site influenced by mineral dust transport [J]. *Atmospheric Environment*, 250-257. doi: 10.1029/2009GL039609
- Nishizawa T, Sugimoto N, Matsui I, et al. 2017. Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 188, 79-93. doi:10.1016/j.jqsrt.2016.06.031
- Omar A, Winker D M, Vaughan M A, et al. 2009. The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(10): 1994-2014. doi:

10.1175/2009jtecha1231.1

- 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 2004. 中国北方沙尘暴研究的若干进展 [J]. 干旱区资源与环境, (S1): 1-8. Qian Z A, Cai Y, Liu J T, et al. 2004. Some advances in dust storm research over Northern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), (S1): 1-8. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.012
- 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 2006. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展 [J]. 地球物理学报, 49 (1): 83-92. Qian Z A, Cai Y, Liu J T, et al. 2006. Some advances in dust storm research over China-Mongolia areas [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (1): 83-92. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.012
- 钱正安, 焦彦军. 1997. 中、美和苏丹强沙尘暴的对比分析 [J]. 干旱气象, 15 (1): 1-5. Qian Z A, Jiao Y J. 1997. Contrast analysis and discussion of severe dust devil in China, America and Sudan [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 15 (1): 1-5.
- 钱正安, 宋敏红, 李万元. 2002. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析 [J]. 中国沙漠, 22(2): 106-111. Qian Z A, Song M H, Li W Y. 2002. Analyses on distribution variation and forecast of sand-dust storms in recent 50 years in North China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 22 (2): 106-111. doi: 10.3321/j.issn:1000-694X.2002.02.002
- 石广玉, 檀赛春, 陈彬. 2018. 沙尘和生物气溶胶的环境和气候效应 [J]. 大气科学, 42 (3): 559-569. Shi G Y, Tan S C, Chen B. 2018. Environmental and climatic effects of mineral dust and bioaerosol [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (3): 559-569. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17280
- 石广玉, 赵思雄. 2003. 沙尘暴研究中的若干科学问题 [J]. 大气科学, 27 (4): 591-606. Shi G Y, Zhao S X. 2003. Several scientific issues of studies on the dust sources [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 591-606. doi: CNKI:SUN:DQXK.0.2003-04-010
- 苏婧. 2010. 中国西北地区沙尘气溶胶辐射强迫效应的研究 [D]. 兰州大学大气科学学院博士学位论文. Su J. 2010. Radiative forcing effect of dust aerosol over Northwestern China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 137pp.
- Shimizu A, Sugimoto N, Matsui I, Arao K, et al. 2004. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidar in China and Japan during ACE-Asia [J]. Journal of Geophysical Research, 109, D19S17. doi:10.1029/2002jd003253
- Sugimoto N, Matsui I, Shimizu A, et al. 2008. Lidar network observations of tropospheric aerosols [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 7153. doi: 10.1117/12.806540
- Sugimoto N, Nishizawa T, Shimizu A, et al. 2014. Characterization of aerosols in east asia with the asian dust and aerosol lidar observation network (ad-net) [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 9262:92620K. doi:10.1117/12.2069892
- Twomey S, 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. Journal of Atmospheric Sciences 34, 1149-1152. doi: 10.1175/1520-0469(1977)034
- Vaughan M A, Young S A, Winker D M, et al. 2004. Fully automated analysis of space-based lidar data: an overview of the CALIPSO retrieval algorithms and data products [J]. Remote Sensing, 16-30. doi: 10.1117/12.572024
- 王式功, 冯鑫媛, 赵春霞, 等. 2011. 沙尘污染及其对人体健康的影响 [C]//2011 年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京: 中国学术期刊电子出版社, 29-35. Wang S G, Fen X Y, Zhao C X, et al. 2011. Dust pollution and the harm to human health [C]//Proceedings of the Taiwan Strait symposium on meteorological science and technology (in Chinese). Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House, 29-35.
- 王涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 2001. 中国北方沙尘暴现状及对策 [J]. 中国科学院院刊, 21 (5): 322-327. Wang T, Chen G T, Qian Z A, et al. 2001. Situations of sand-dust storms and countermeasures in Northern China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 21 (5): 322-327. doi:10.3969/j.issn.1000-3045. 2001. 05. 007

- 王文彩. 2013. 沙尘气溶胶的传输和气候效应的观测研究 [D]. 兰州大学大气科学学院博士学位论文. Wang W C. 2013. Observation study of dust aerosols' transport and climate effect [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 160pp.
- Winker D M, Hunt W H, Hostetler C A, et al. 2004. Status and performance of the CALIOP lidar [J]. Remote Sensing, 5575:8-15. doi:10.1117/12.571955
- Winker D M, Hunt W H, McGill M J, et al. 2007. Initial Performance Assessment of CALIOP[J]. Geophysical Research Letters, 34(19). doi: 10.1029/2007gl030135
- 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 2000. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策 [J]. 地球科学进展, 15 (4): 513-521. Ye D Z, Chou J F, Liu J Y, et al. 2000. Causes of sand-stormy weather in Northern China and Control Measures [J]. Advances in Earth Science, 15 (4): 513-547. doi:CNKI:SUN:DXJZ.0.2000-04-000
- Young, Stuart A, Vaughan, Mark A. 2009. The Retrieval of Profiles of Particulate Extinction from Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) Data: Algorithm Description [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 26(6):1105-1119. doi: 10.1175/2008jtecha1221.1
- Zhao Y, Liu Z, Omar A, et al. 2008. CALIPSO lidar observations of the optical properties of Saharan dust: A case study of long-range transport [J]. Journal of Geophysical Research, 113 (D7): D07207. doi: 10.1029/2007jd008878
- 张华, 黄建平. 2014. 对 IPCC 第五次评估报告关于人为和自然辐射强迫的解读 [J]. 气候变化研究进展, (1): 40-44. Zhang H, Huang J P. 2014. Interpretation of the IPCC fifth assessment report on anthropogenic and natural radiative forcing [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 10 (1): 40-44. doi: CNKI: SUN:QHBH.0.2014-01-010
- 张丁玲, 黄建平, 刘玉芝, 等. 2012. 利用 CERES(SYN)资料分析青藏高原云辐射强迫的时空变化 [J]. 高原气象, 31 (5): 1192-1202. Zhang D L, Huang J P, Liu Y Z, et al. 2012. Analysis on temporal and spatial variations for cloud radiation forcing over Qinghai-Xizang plateau using CERES(SYN) Data [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (5): 1192-1202.
- Zhou T, Huang J, Huang Z, et al. The depolarization-attenuated backscatter relationship for dust plumes [J]. Optics Express, 2013, 21 (13): 15195-15204. doi:10.1364/OE.21.015195
- 祝存兄. 2015. 南京北郊多功能激光雷达边界层气溶胶观测 [D].南京信息工程大学大气物理学院硕士学位论文. Zhu C X. 2015. Observations of boundary layer aerosol over Northern Suburb of Nanjing by multifunction Lidar [D]. M.S.thesis (in Chinese), School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology.