

引用格式: CHENG Liangliang, XIE Chenbo, YANG Hao, et al. Observation and Analysis of a Haze Pollution Event in Beijing by Spaceborne and Ground-based Lidars[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0301001

程亮亮, 谢晨波, 杨昊, 等. 北京地区一次霾污染过程的星-地激光雷达联合观测与分析[J]. 光子学报, 2022, 51(3):0301001

北京地区一次霾污染过程的星-地激光雷达联合观测与分析

程亮亮^{1,2,3,4}, 谢晨波^{1,3}, 杨昊^{1,2,3}, 方志远^{1,2,3}, 赵明^{1,3}, 邓旭^{1,2,3}, 王邦新^{1,3},
邢昆明^{1,3}

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

(3 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

(4 合肥师范学院 电子信息系统仿真设计安徽省重点实验室, 合肥 230601)

摘 要:以北京市 2015 年 1 月 11-17 日发生的连续灰霾污染过程为例, 采用地基和星载激光雷达联合观测, 反演得到气溶胶的垂直分布特征。由 MODIS 卫星遥感数据和 HYSPLIT 后向轨迹模式分析得出污染来源和传输路径, 结合地面空气质量和气象观测数据揭示了本次污染的成因。结果发现, 根据激光雷达数据反演的近地面气溶胶消光系数与地面 PM_{2.5} 浓度变化总体较为一致, 而气溶胶边界层高度与 PM_{2.5} 浓度呈相反变化趋势, 且最低边界层高度为 500 m。污染期间为小风高湿天气, 地面平均风速和相对湿度分别为 1.35 m/s 和 66%, 连续多日逆温层的出现抑制了污染物在垂向空间的扩散传输, 逆温强度高达 5°C, 这两方面因素导致污染物的持续积累, 最终, 在 16 日凌晨, PM_{2.5} 浓度达到 448 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。污染最后在 16 日偏南风的作用下得以解除, PM_{2.5} 浓度的下降速度达到 82 $\mu\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 。观测期间, PM_{2.5} 与 NO₂、CO 的相关系数分别为 0.766 和 0.901, 呈显著正相关, 可见 NO₂ 等气态前体污染物转化而来的二次气溶胶是霾的重要来源。综合分析表明, 本次污染以灰霾为主, 由区域传输和局地排放的气溶胶叠加、累积而成, 河北南部及河南、山西等地的污染物随高空气团传输到北京地区, 与本地排放的污染气溶胶混合在一起, 导致污染加重。

关键词: 污染; 激光雷达; 边界层; CALIPSO; MODIS; 后向轨迹

中图分类号: X831

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225103.0301001

0 引言

气溶胶是悬浮在空气中的固态和液态颗粒物, 广泛存在于日常生活中, 它可通过直接或间接作用影响地球辐射收支平衡^[1]。气溶胶粒子的浓度、大小、结构以及化学组成影响人类健康和生存环境, 因此对某一区域气溶胶进行连续监测很有必要^[2-4]。随着我国城市化进程的加快, 居民生活水平得到很大提高, 然而由灰霾天气导致的环境和气候问题却频繁在多地出现, 尤其是京津冀、长三角和珠三角等人口相对密集的地区^[5]。北京是我国的政治、文化和科技创新中心, 工业基础设施完善, 常住人口已超 2 100 万人(第七次人口普查数据), 近年来, 多次发生的霾污染事件, 对当地居民的健康和出行均造成严重影响。对此, 不少学者从不同角度对污染成因和来源进行了研究, 如宋宇等基于正定矩阵分解(Positive Matrix Factorization, PMF)

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(No.XDA17040524), 民用航天技术预先研究项目(No.D040103), 中国科学院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目(No.KP-2019-05), 2019年安徽省科技重大专项(No.201903c08020013), 电子信息仿真设计安徽省重点实验室项目(No.2020ZDSYSYB05), 2020年合肥师范学院省级科研平台项目(No.2020PT12)

第一作者: 程亮亮(1987—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为激光雷达技术。Email: ccliang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 谢晨波(1976—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气遥感和环境监测。Email: cbxie@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-09-19; **录用日期:** 2021-11-16

<http://www.photon.ac.cn>

方法分析得出地面扬尘、建筑源、生物质燃烧、二次源、机动车排放和燃煤是北京地区大气细粒子的主要来源^[6]。HUANG Rujin等利用先进的离线分析技术和统计方法对北京霾颗粒物化学成分进行研究,认为北京地区的严重霾污染事件很大程度上受到二次气溶胶的影响,二次气溶胶占PM2.5来源的50%^[7]。这与唐傲寒等的研究结果一致,即人为排放的污染物在静稳逆温条件下经过气-固和液相反应生成的二次细颗粒物导致北京市的灰霾污染^[8]。卫星遥感技术也可用于辅助追踪污染来源,如YAN Renchang等利用多个地面污染监测站和光学厚度遥感数据,结合后向轨迹和受体模型对污染的来源和贡献进行分析,认为污染物主要从北京南部地区传输而来,其中重度霾主要来源于西南地区^[9]。邱昀等基于卫星遥感及地面监测数据对2018年3月份京津冀地区的污染传输过程进行了分析,发现逆温层等气象不利因素的出现,对区域性污染的形成影响较大^[5]。此外,部分研究者通过地基和星载激光雷达联合观测污染过程,因而能更精确的获取气溶胶的时空分布特征。如秦凯等分析了一次大面积霾污染的跨省传输过程,认为霾从华北平原传输到华中地区可能受冬季季风影响^[10]。杨昊等对合肥地区不同天气状况(沙尘、多云、有云和无云时的污染天气)下气溶胶的类型,污染来源及成因进行了分析^[11]。

目前,针对北京地区不同时期的霾污染现象开展的研究较多,主要是从气溶胶化学成分和光学特性等角度分析霾的成因和传输过程,但综合运用多源传感器数据进行全面观测的研究不多。本文在以上研究基础上,从星-地两个视角对2015年1月北京市发生的一次连续霾污染过程进行分析。利用地基和CALIPSO星载激光雷达数据反演获取消光系数、总后向散射系数和气溶胶类型,从而观测污染期间气溶胶粒子的时空分布特征,基于卫星遥感光学厚度和后向轨迹图分析了本次污染的来源和传输路径,最后对比地面气象站和空气质量监测数据,推测本次霾污染的成因。

1 数据和方法

地基激光雷达作为探测气溶胶的常用手段,能够获取气溶胶光学特性的垂直分布特征。提供研究数据的地基激光雷达由中国科学院安徽光学精密机械研究所自行研制,被放置在北京市怀柔区中国科学院大学雁栖湖校区(116.631°E,40.316°N),主要由激光器、望远镜、光学接收单元和数据采集系统组成(图1)。Nd:YAG激光器发射1064 nm的近红外光,同时二倍频产生532 nm的绿光,它们与大气气溶胶粒子发生散射、吸收等相互作用。其中后向散射光由望远镜接收,并经过光阑、分光片和干涉滤光器后,分为三个通道(532 nm水平和垂直偏振通道、1064 nm通道),其中532 nm信号由光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)接收,1064 nm信号由雪崩光电二极管(Avalanche Photon Diode, APD)接收^[12]。采集系统以20 MHz采样率、12位分辨率对信号连续采样,并将结果传输至计算机进行反演,最终得到气溶胶在该观测点的消光系数时空分布图。

激光在传输过程中遇到气溶胶粒子和云层时会发生吸收和散射效应,因本文主要探测气溶胶粒子浓度的时空分布,因此采用回波信号较强的Mie散射激光雷达进行观测,基于广泛使用的Fernald后向积分算法^[13]反演气溶胶消光系数。Mie散射激光雷达在不同高度接收的大气后向散射回波信号功率表示为^[11,13-14]

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

式中, $P(z)$ 表示在高度 z 处接收的大气后向散射信号功率(单位为W), K 为雷达系统常数(单位为 $W \cdot km^3 \cdot sr$),与激光器能量、望远镜口径等有关, $\beta_a(z)$ 和 $\beta_m(z)$ 分别是大气气溶胶粒子和空气分子在高度 z 处的后向散射系数(单位为 $km^{-1} \cdot sr^{-1}$), $\alpha_a(z)$ 和 $\alpha_m(z)$ 分别为气溶胶和空气分子的消光系数(单位为 km^{-1})。由式(1)可知,大气后向散射信号的强度与高度 z 的平方成反比,因此有时以距离平方校正信号 $P(z) \cdot z^2$ 观测气溶胶的垂直分布特性。由于式(1)中消光系数 $\alpha_a(z)$ 、 $\alpha_m(z)$ 及后向散射系数 $\beta_a(z)$ 、 $\beta_m(z)$ 均为未知变量,因此Fernald法对消光系数与后向散射信号的比值做出了假设。经过大量实验观测,研究人员发现气溶胶消光系数 $\alpha_a(z)$ 与后向散射系数 $\beta_a(z)$ 存在关系

$$\frac{\alpha_a(z)}{\beta_a(z)} = S_1 \quad (2)$$

式中, S_1 为大气气溶胶消光后向散射比(也称激光雷达比),不同种类的气溶胶类型的 S_1 值差异较大,本文根

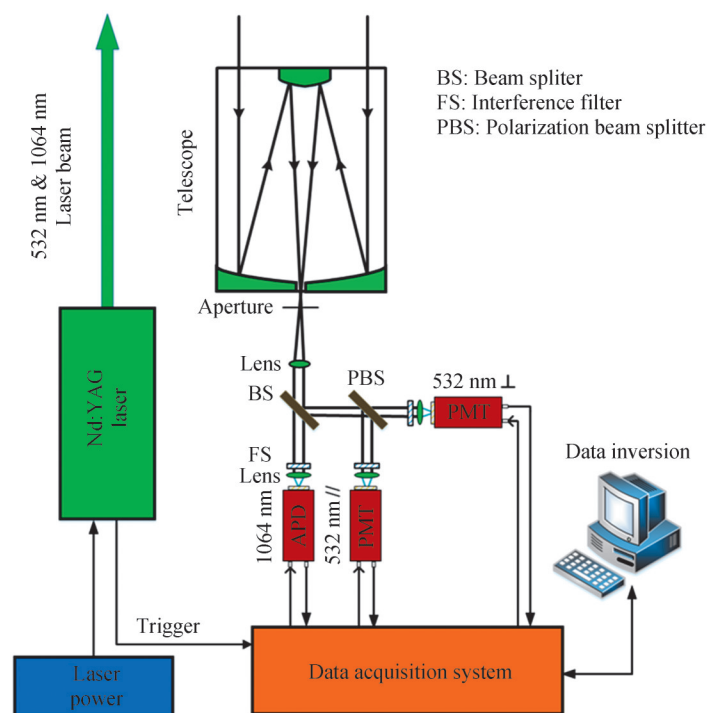


图1 激光雷达结构

Fig.1 Lidar structure diagram

据观测点气溶胶类型取 50^[15]。对于空气分子消光后向散射比,根据美国标准大气模式确定,即假定

$$\frac{\alpha_m(z)}{\beta_m(z)} = \frac{8\pi}{3} \quad (3)$$

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 是 NASA 和 CNES 于 2006 年 4 月 28 日发射的太阳轨道地球观测卫星,它搭载的云-气溶胶偏振激光雷达(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP)发射 532 nm 和 1064 nm 两个波长的激光,接收端使用三个通道进行探测,即 532 nm 水平、垂直偏振通道以及 1064 nm 通道,能够反演后向衰减散射系数、体积退偏比和色比值^[16]。本文使用 Level 1B 数据产品获取卫星过境北京时的总衰减后向散射系数(Total Attenuated Backscatter Coefficient, TABC),使用 Level 2 产品分别获取大气垂直分层类型(Vertical Feature Masks, VFM,分为气溶胶、云、清洁大气、地平面、地下层、对流层等)和气溶胶子类型(Aerosol Subtype, AS,分为烟雾、沙尘、污染沙尘、清洁大陆、污染大陆、清洁海洋等)。

星载与地基激光雷达观测气溶胶的视角、工作方式、探测范围及精度均不同,反演的结果也有差异^[11]。地基激光雷达从地面向天空发射激光,由式(1)给出的激光雷达方程可知,回波信号的衰减速度与距离平方成反比,因此近地面气溶胶回波强度较大,信噪比较高,探测精度高。但地基激光雷达一般采取定点观测,所以区域探测能力有限。星载激光雷达绕地球周期性转动,可以观测某一地区污染的空间分布特性,但它从距地面较远的卫星向下探测,遇到高空云层时,激光能量衰减很大,信噪比较低,探测精度远不及地基激光雷达。星-地激光雷达对观测数据的处理算法侧重点有所不同,地基激光雷达可以获取气溶胶的消光系数时空变化,而星载激光雷达除了可获得气溶胶总后向散射系数时空分布外,还能得到垂直特征层和气溶胶类型等信息。此外,它们的垂直分辨率等参数也不同,具体区别如表 1 所示。综上所述,星-地激光雷达联合观测,可以相互补充,从而更精确的获取污染物光学特性的时空变化。

MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)是由 NASA 发布,搭载于 Terra(上午星)和 Aqua(下午星)卫星上的中分辨率成像光谱仪传感器,共有 36 个光谱波段,可用于探测气溶胶光学厚度、大气温度、云顶高度和臭氧含量等。MODIS 提供的产品时间分辨率有日、月、季、年等不同类别,本文基于 550 nm MODIS 日平均气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)数据(<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>)分析此次霾污染的空间分布特征^[17]。AOD 是气溶胶消光系数在垂直路径的积分,可用于评估近地面 PM2.5

质量浓度^[18]。

表1 地基和星载激光雷达参数对比
Table 1 Comparison of ground-based and spaceborne lidar parameters

Main technical parameters	Ground lidar	CALIPSO
Laser wavelength / nm	532/1 064	532/1 064
Single pulse laser energy / mJ	500/1 000	110
Pulse Repetition Frequency / Hz	20	20.16
Divergence angle (full angle) / μ rad	<500	100
Field of View (full angle) / μ rad	500	130
Telescope Diameter / mm	300	1 000
Type of photodetector	PMT/APD	PMT/APD
Horizontal resolution / m	/	333
Vertical resolution / m	7.5	30~60

为进一步了解本次污染的成因,结合地面空气质量监测和气象站数据进行对比观测。空气质量数据从中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台获取(<http://106.37.208.233:20035/>),包括PM2.5、PM10、SO₂、NO₂和CO五个要素。其中PM2.5是指悬浮在大气中,空气动力学当量直径小于2.5 μ m的颗粒物(也称细颗粒物),PM10则指空气动力学当量直径小于10 μ m的颗粒物(又称可吸入颗粒物)。SO₂和NO₂是影响空气质量的主要污染气体,也是PM2.5的重要前体物。相关对比分析将在第2部分讨论。气象条件对气溶胶粒子的生消和扩散传输影响很大。因此从中国气象局气象数据中心(data.cma.cn)获取了怀柔区逐小时气象数据,用于分析相对湿度(Relative Humidity, RH)、风速(Wind Speed, WS)、风向(Wind Direction, WD)、温度(Temp)对本次污染的影响。研究表明,对流层大气温度一般随着高度升高而降低,但有时会出现不降反升的情况,相应的大气层即为“逆温层”,此时大气层结较稳定,逆温层的出现会阻碍气溶胶粒子垂直方向的对流活动,不利于污染物的扩散传输,导致污染粒子在本地积累^[19]。因此本文从美国怀俄明大学工程学院(<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)获取了污染期间北京地区的垂直温度分布数据,并绘制曲线。

为追踪霾污染的传输路径及来源,利用HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model)后向轨迹模式分析不同高度气团的传输轨迹。HYSPLIT由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)空气资源实验室联合澳大利亚气象局开发,可用于计算和分析大气传输和扩散特性^[20]。

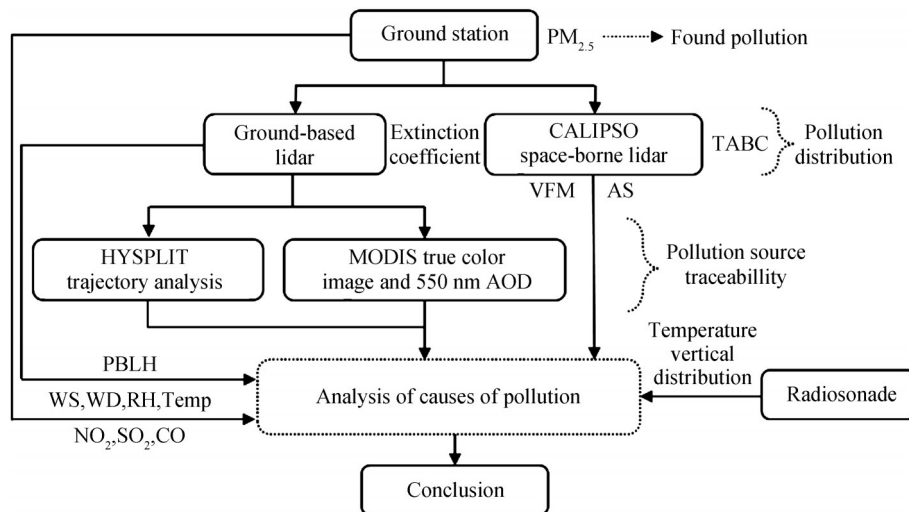


图2 基于多源传感器数据分析污染的流程
Fig.2 Flow chart of pollution analysis based on multi-source sensor data

本文基于地面PM_{2.5}和PM₁₀颗粒物浓度,发现了北京地区一次持续多日的霾污染事件。为了找到污染的来源及成因,首先,结合地基激光雷达在同时间段连续观测的数据,反演得到气溶胶消光系数和边界层高度等参数,联合地面站点观测的PM_{2.5}浓度,初步分析污染的生消过程。其次,根据气溶胶消光系数时空分布图,选取不同高度值作为终点,基于HYSPLIT模型进行48 h后向轨迹分析。结合从MODIS传感器获取的真彩图、气溶胶光学厚度空间分布图共同确定污染来源。通过CALIPSO星载激光雷达过境北京时,反演生成的气溶胶总后向散射系数,特征层类型以及气溶胶子类型参数,进一步提升了霾污染分析的可靠性。最后,结合地面监测站点观测的气象要素和污染气体浓度,综合分析本次霾污染的成因。基于多源传感器数据进行霾污染分析的详细流程如图2所示。

2 结果和讨论

2.1 地面气象观测结果

2015年1月北京市发生持续多日的大气污染事件,图3为观测期间(1月11-17日)地面站点获取的两种颗粒物(PM_{2.5}和PM₁₀)浓度及两者比值(PM_{2.5}/PM₁₀)的时间序列图。图1中阴影区域为污染区间(1月11日19:00-16日6:00期间PM_{2.5}>75 μg/m³)(中国环境空气质量标准^[21] GB3095-2012根据PM_{2.5}浓度将污染分为六个等级,75 μg/m³为污染阈值)。1月11日,PM_{2.5}平均浓度为38 μg/m³,全天大部分时段低于50 μg/m³,气溶胶浓度较低,空气质量较好。11日午后PM_{2.5}浓度逐渐增大,至12日0:00时达到峰值120 μg/m³,可见污染物开始积聚,空气质量逐渐变差。12日PM_{2.5}浓度均超过75 μg/m³,峰值浓度172 μg/m³(五级重度污染)。13日凌晨2:00到上午9:00期间,PM_{2.5}浓度持续下降,随后稳步上升,晚上12:00到达峰值225 μg/m³(五级重度污染),夜间开始下降。1月14日7:00后,PM_{2.5}浓度整体保持上升趋势,在15日凌晨3:00到达峰值273 μg/m³(六级严重污染),随后下降至227 μg/m³。15日早上8:00后PM_{2.5}浓度逐步上升,并在次日凌晨1:00达到此次霾污染过程的最高值448 μg/m³(六级严重污染)。16日凌晨3:00后,PM_{2.5}浓度急剧下降,早晨8:00时低至19 μg/m³,下降速度高达82 μg/(m³·h)。至此污染解除,随后的14小时里,PM_{2.5}浓度均保持较低值,平均浓度仅为12 μg/m³。PM₁₀总体上与PM_{2.5}变化趋势一致,污染期间PM_{2.5}/PM₁₀大部分时间均高于0.8,说明PM_{2.5}是主要污染物。值得一提的是,1月12日下午2:00-6:00和1月15日上午7:00-10:00期间PM_{2.5}/PM₁₀突然下降,尤其是15日上午9时的PM_{2.5}/PM₁₀比值低至0.53,说明近地面大气中大颗粒物的气溶胶粒子含量占比上升,可能是工厂或地面扬尘所致。

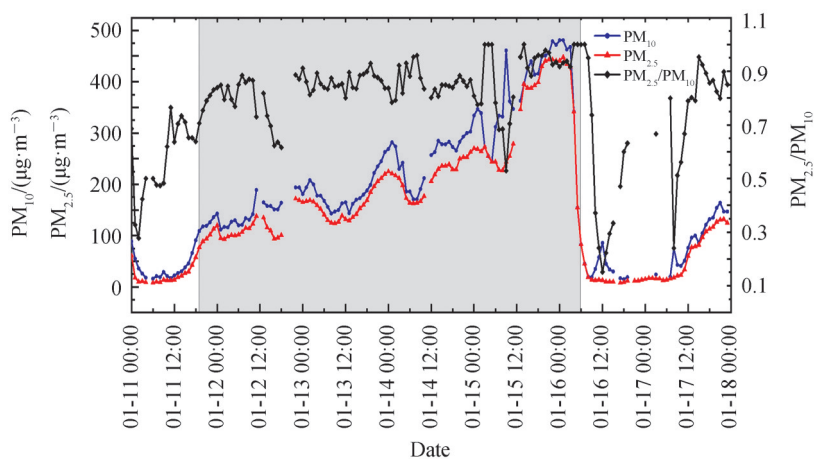


图3 PM_{2.5}、PM₁₀浓度及PM_{2.5}/PM₁₀时间变化曲线

Fig. 3 Time series of PM_{2.5}, PM₁₀ concentration and PM_{2.5}/PM₁₀

2.2 地基激光雷达观测结果

图4(a)和(b)分别是2015年1月11-17日,位于北京怀柔区的地基激光雷达连续观测的532 nm和1 064 nm消光系数时空变化,图4(c)是532 nm波长的距离平方校正信号(Range-Corrected Signal, RCS)的时空分布以及根据梯度法反演的边界层高度(Planetary Boundary Layer Height, PBLH)。由于多次观测到高云,云顶高

于9 km,因此将反演高度统一保留为10 km。由图4(a)可见,1月11日白天近地面532 nm的消光系数较低(小于 0.1 km^{-1}),空气质量良好。11日凌晨4 km高空有较低浓度气溶胶(消光系数为 0.3 km^{-1})向地面沉降,可能是从外地传输而来。当天边界层高度较高(3~4 km),直到下午6时左右明显下降,这与图3中PM2.5浓度的变化趋势相反。11日下午近地面消光系数开始增大,消光能力增强,并出现分层现象。部分局地排放的污染物与高空传输而来的气溶胶混合在一起,形成上层污染气溶胶层,在12日中午达到2 km高度,当日消光系数峰值超过 1 km^{-1} ,为明显的霾污染天气。13日凌晨在7 km附近探测到厚云,云顶达8.8 km。此后上层气溶胶层(1.6 km左右)消光系数明显增大,峰值超过 1 km^{-1} ,说明高层污染较为严重,图4可以看出,气溶胶开始缓慢沉降,14日凌晨两层气溶胶混合在一起。13日下午开始下层气溶胶消光系数显著增大,形成连续污染带,边界层为1.3 km左右,大气层结较稳定,因此不利于污染物的扩散。14日下午2:00

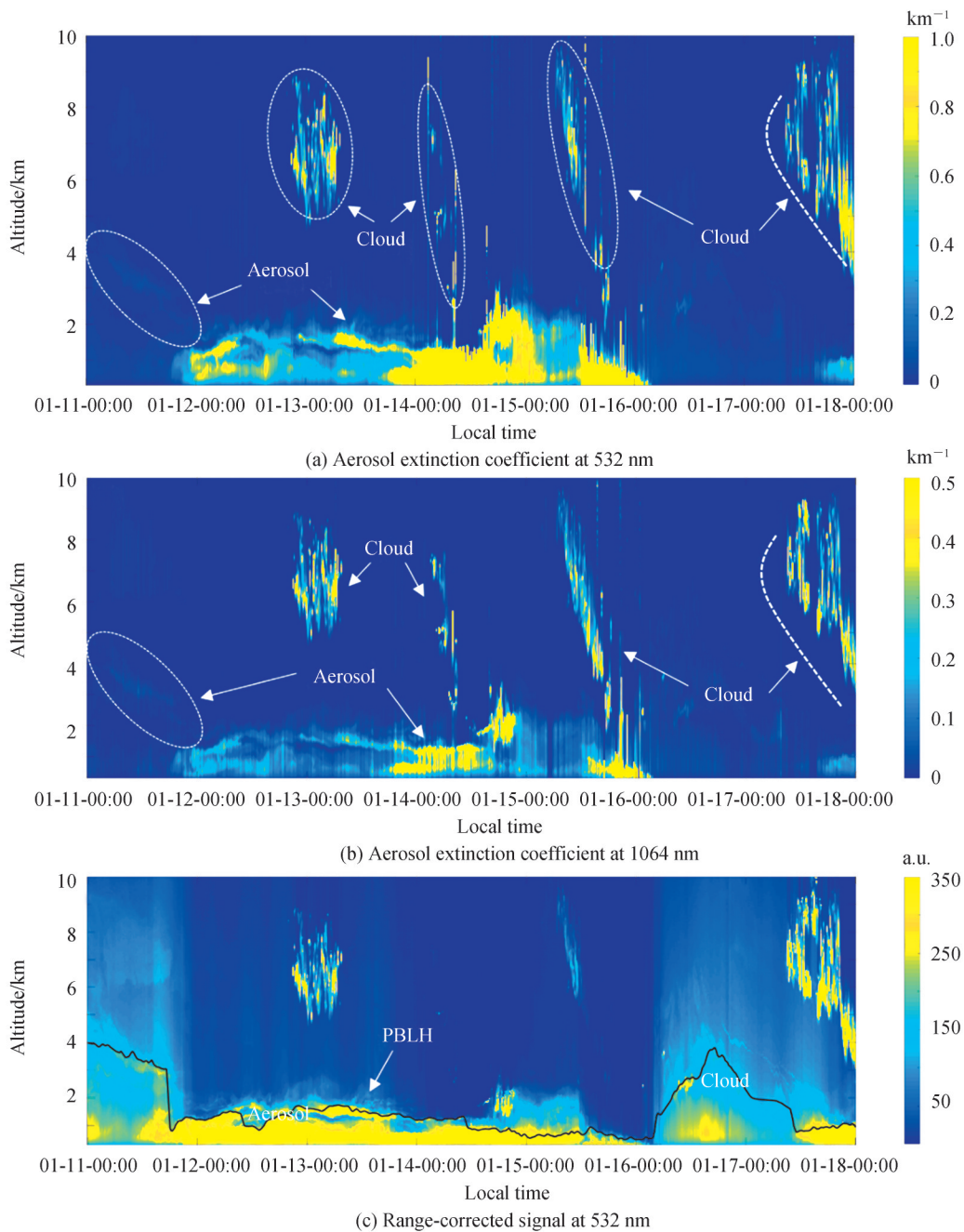


图4 观测期间激光雷达消光系数时空变化及距离平方校正信号时空变化、边界层高度
Fig. 4 Spatial-temporal variation of lidar extinction coefficient and lidar range-corrected signal and planetary boundary layer height during observation period

起污染物向高空扩散传输,最高达3 km,但近地面回波信号相对较强,边界层高度低于1 km,PM_{2.5}浓度依然较高。15日中午至16日凌晨,边界层高度呈下降趋势,最低为500 m。从图3可知,该时间段的PM_{2.5}浓度较高,呈逐步上升的变化趋势,在边界层最低时具有最高值,说明激光雷达探测的数据与地面监测站数据具有很好的一致性。16日凌晨5:00后消光系数较低(小于 0.1 km^{-1}),从图4(c)可见,边界层高度急剧上升,最高处近4 km,近地面污染物稀释扩散,气溶胶浓度迅速降低,污染解除,这是当天的大风(平均风速为 2.99 m/s)所致。根据气溶胶粒子对不同波长激光后向散射作用的不同,激光雷达能够区分大气中气溶胶粒径的相对大小^[22-23]。由图4(b)可见,当遇到云层等大粒子时,相应位置1064 nm波长的消光系数较大,而对于粒径较小的粒子,该波长的气溶胶消光系数较小。

根据激光雷达探测的气溶胶垂直分布特征,选取不同高度进行气团的48 h后向轨迹分析,由图5(a)可知,1月12日,1.6 km高空污染物从西南方向的河南、山西等地途经河北到达北京,500 m和1 km气团则主要来源于北方,其中1 km气团从蒙古国的高空传输而来。从图5(b)可以看出,1月13日,1.6 km高空气团来源方向基本不变,但轨迹线更长,说明大气流动性好。1 km气团从北京东南方向的江苏等地途径安徽、河南和河北传输而来,500 m低空气团主要来自周边地区。从激光雷达消光系数时空分布图(图4)可见,1月14日污染较前一天严重,边界层高度较低(1.3 km左右)。从图5(c)可以看出,500 m、800 m和1.3 km污染气团均来自北京南部地区,其中1.3 km气溶胶来自低空气团在13日0时开始的上升气流。而500 m低空污染气团来自于河北南部,轨迹线较短,大气层结较稳定。1月15日,污染较为严重,从激光雷达图可见,高层气溶胶

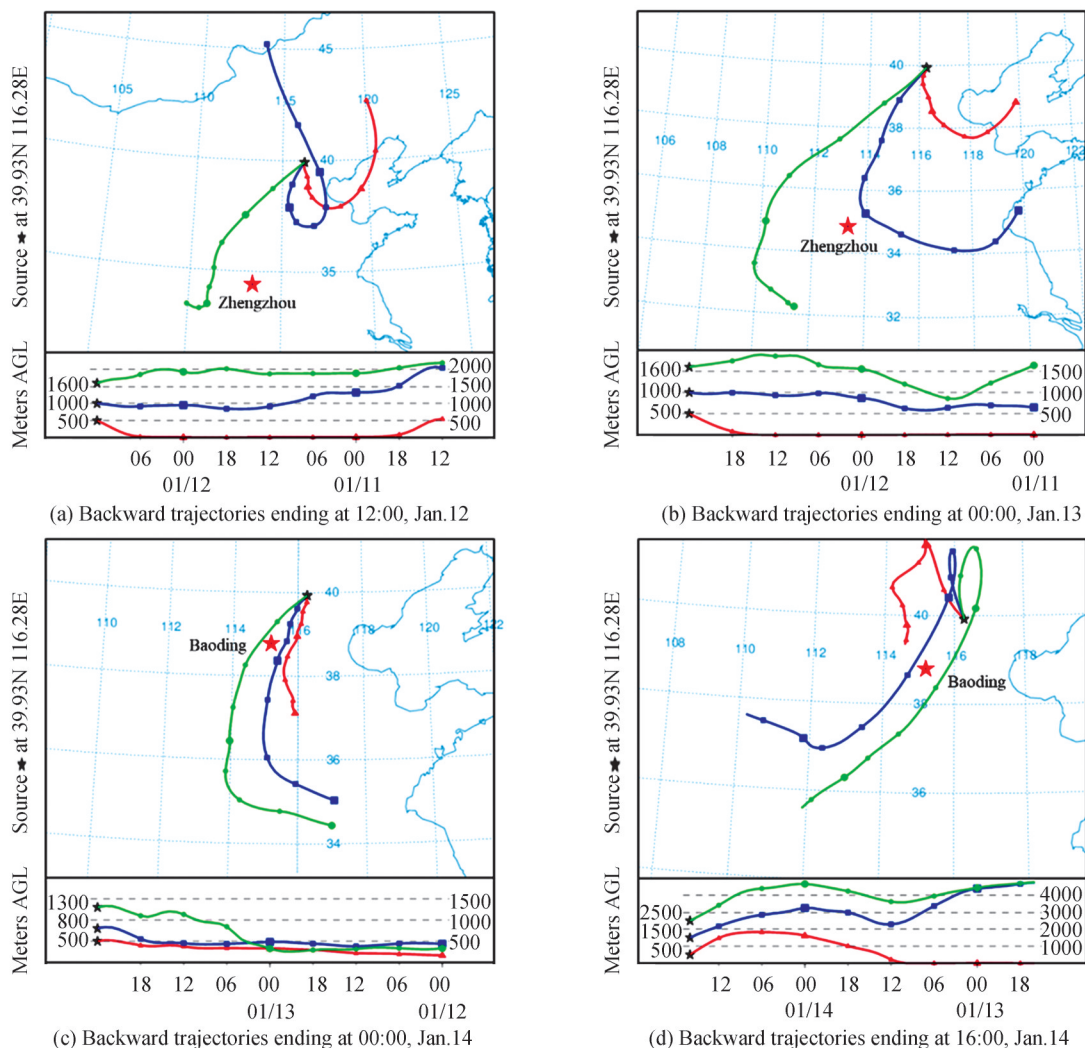


图5 2015年1月12-15日污染期间48 h HYSPLIT后向轨迹(UTC时间)
Fig. 5 The 48 h backward trajectory by HYSPLIT during the pollution period from January 12 to 15, 2015 (UTC Time)

向上运动。图5(d)后向轨迹显示,1.5 km和2.5 km高空气溶胶主要从山西等地的高空气流沉降而来,500 m处气团则来源于周边地区。

为了进一步验证HYSPLIT气团轨迹分析的可靠性,结合地面站点监测的PM_{2.5}浓度进行佐证。在图5的污染传输路径上,选择距离北京较近的河北保定及较远的河南郑州作为参考点,绘制相应时段两地的PM_{2.5}浓度时间序列(图6),由图可见,1月11日下午4:00左右,郑州经历一次持续时间较短的霾污染过程,PM_{2.5}浓度峰值为303 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从图5(a)、(b)的轨迹线可见,在该时段,污染气团经过郑州及其周边地区。而在1月11-14日,保定经历多次程度不同的污染过程,1月13日下午6:00出现高峰,PM_{2.5}浓度高达379 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,由图5(c)、(d)的气团后向轨迹可以看出,北京东南方向城市传输而来的污染气团途经保定,最终到达北京。

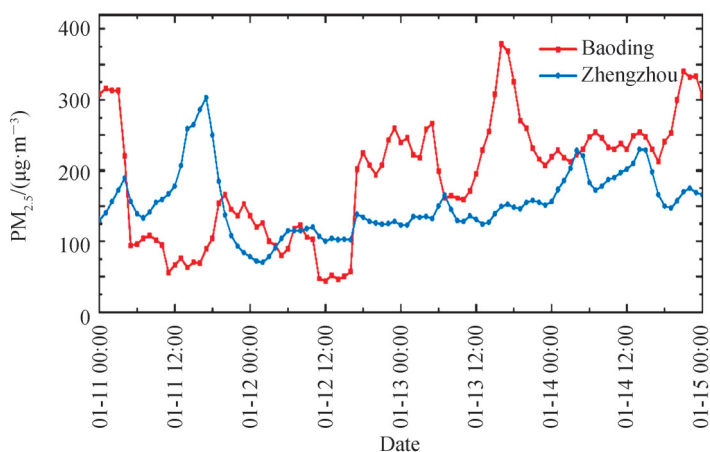


图6 2015年1月11-14日郑州及保定PM_{2.5}浓度时间序列图

Fig.6 Time series of PM_{2.5} concentration in Zhengzhou and Baoding on January 11-14, 2015

2.3 MODIS及星载CALIOP遥感观测结果

图7是MODIS遥感真彩图,其中红色方框内为北京地区,深蓝色线为CALIPSO过境北京的轨迹线。从图7(a)中可见,1月12日北京上空有少量的云层和气溶胶,而北京西南地区的气溶胶层较厚;从图7(b)中可以看出,1月13日,北京地区上空正在经历较大的灰霾污染,颜色上呈暗灰色,而北京的西南河北保定,河南等地区也呈现严重的污染态势。

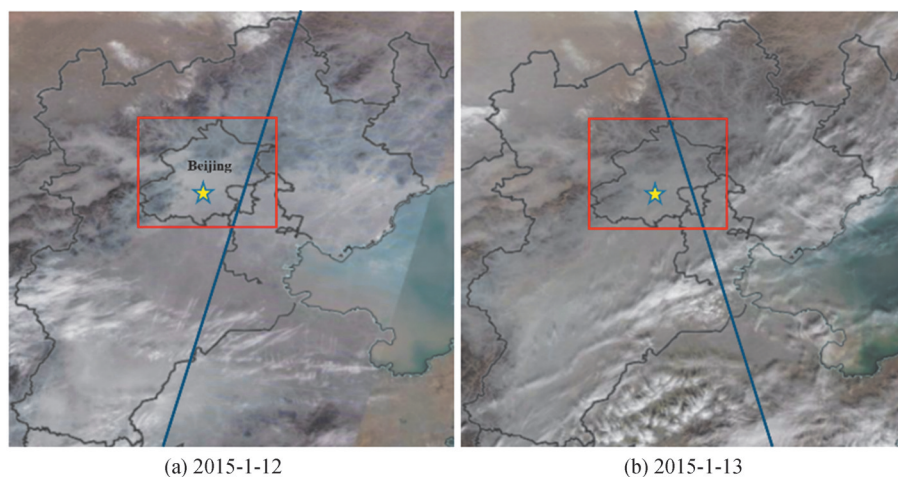


图7 MODIS遥感真彩图(UTC时间)

Fig. 7 MODIS remote sensing true color image (UTC time)

图8是MODIS卫星遥感气溶胶光学厚度(AOD)区域分布图。在排除云等因素影响的前提下,一般AOD值越大,相应地区的污染越严重。图8(a)为2015年1月12日AOD空间分布图(因多云遮挡,部分区域

AOD无法反演,图中为白色空白),当日 AOD 高值区出现在北京市北郊,值为 0.6~0.7 之间,图中表现为黄色或深黄色,说明污染已在此聚集,但浓度相对不高。而位于北京西南方向的河北南部等地区 AOD 值超过 0.9,图中显示为红色,说明该地污染较为严重。由图 8(b)可以看出,相比前一天,1月 13 日北京市及天津、河北省廊坊、保定等周边城市 AOD 值明显增大,峰值超过 1.0,图中表现为大面积红色。而北京西南方向的山西、河南等地同样为 AOD 高值区,说明这些区域污染较重。对比 12 日和 13 日 AOD 高值区(红色区域)的位置变化发现,北京及周边地区的高浓度气溶胶是从其西南方向的河南西部、山西南部转移而来,这与图 5 的 HYSPLIT 轨迹分析得出的结论较为一致。由于卫星遥感易受多云等天气影响,导致后面几天缺乏有效数据,因此 MODIS 仅选取 12 日和 13 日的观测结果。

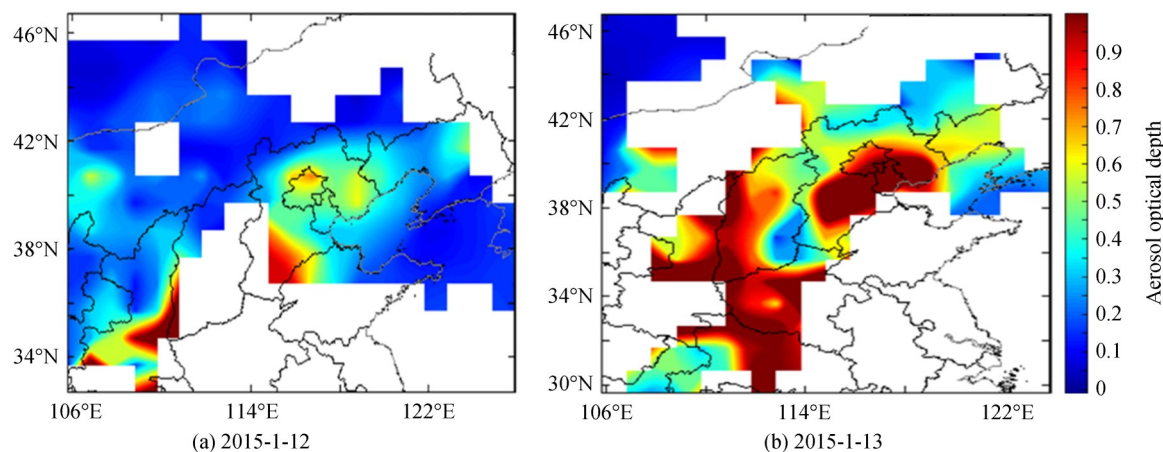
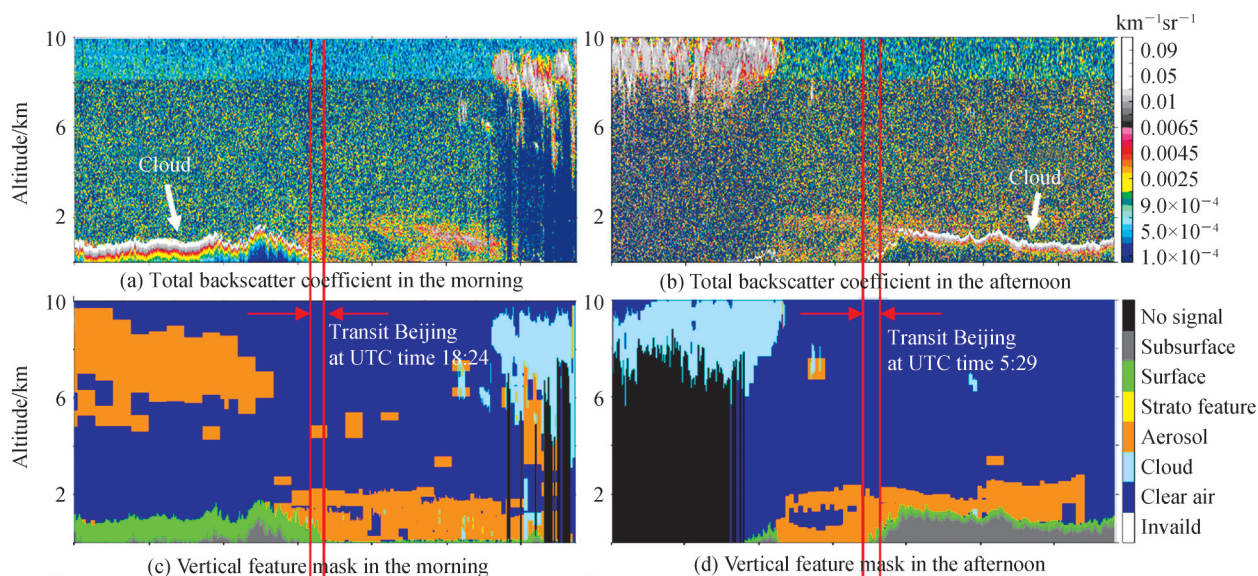


图 8 MODIS 遥感观测的 550 nm 气溶胶光学厚度 (UTC 时间)
Fig. 8 The 550 nm AOD observed by MODIS remote sensing (UTC time)

CALIPSO 卫星分别于 2015 年 1 月 12 日凌晨 2:24(由北向南)和下午 1:29(由南向北)左右过境北京。由图 9(a)可知,2 km 以下分布着大量气溶胶,后向散射系数最大为 $4.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,图中为橙红色。结合图 9(c)的垂直特征层和图 9(e)的气溶胶子类型图可以看出,卫星扫过的区域有污染沙尘型和污染大陆型气溶胶两种,不同位置气溶胶类型不同。在卫星扫过的低纬度地区(北京南边城市)后向散射系数也较大,这与 MODIS 遥感观测结果较为一致。12 日下午卫星再次过境北京,从图 9(b)能够清楚看出,污染仍然存在。由于白天探测时太阳辐射背景噪声较大,因此信噪比相对夜晚探测时(图 9(a))要低。结合图 9(d)、(f)可以看出,卫星过境区域 2 km 以下含大量污染大陆和污染沙尘型(浮尘)气溶胶。对比图 4 可以发现,星载激光雷达与地基激光雷达均在 2 km 高度以下探测到大量气溶胶粒子,说明探测的数据是可信的。



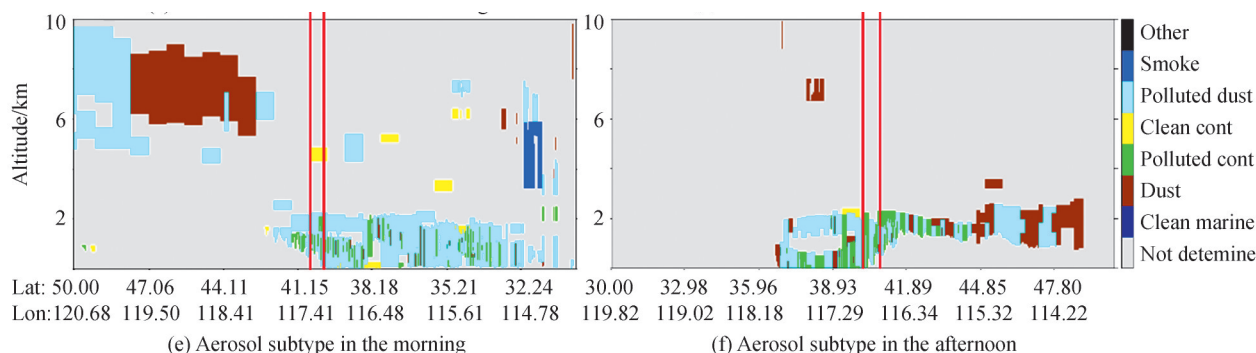
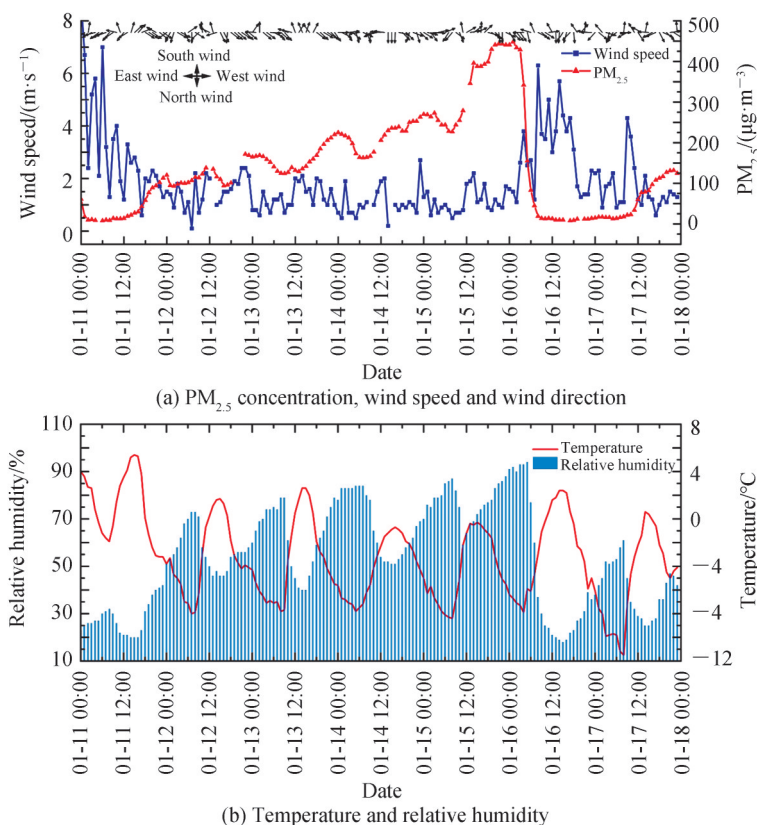


图9 CALIPSO过境北京时观测的总后向散射系数、垂直特征掩膜和气溶胶子类型

Fig. 9 Total backscatter coefficient, vertical feature mask, and aerosol subtype observed during CALIPSO transits over Beijing

2.4 气象要素数据观测结果与污染成因分析

研究表明,霾形成的必要条件是污染排放,而决定颗粒物是否会在边界层内聚集,并导致能见度降低的因素是气象条件^[24]。1月11日为晴转多云天气,空气质量良好,当天平均风速为3.16 m/s,且起伏较大,最高风速超过7 m/s,风向多变,以偏北风为主。由图10(a)可见,受大风影响,PM_{2.5}浓度总体较低,平均为38 μg/m³。从(b)图可以看出,当日相对湿度较低,温度较高(下午3:00达到观测期间的最高值5.4 °C),这可能是因为干净天气溶胶的消光能力较差,地表太阳辐射增强。12-16日是本次霾污染的形成与积累过程。从12日下午开始地面气溶胶浓度总体上处于上升趋势,16日早晨PM_{2.5}浓度达到448 μg/m³。污染期间风速较低(12-16日日平均风速分别为1.50 m/s、1.28 m/s、1.08 m/s、1.13 m/s),相对湿度较高(12-16日平均相对湿度为62%)。连续的小风高湿天气,导致污染物在本地大量聚集,且逐日增加。16日凌晨2:00的一场偏北风(3:00-下午6:00间平均风速为3.71 m/s,最大风速达6.30 m/s)使得气溶胶迅速扩散,PM_{2.5}浓度从

图10 2015年1月11-17日PM_{2.5}浓度与地面气象参数Fig. 10 PM_{2.5} concentration and ground meteorological parameters on January 11-17, 2015

429 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (凌晨3:00)骤降到19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (早晨8:00),下降速度达82 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$,17日空气质量良好,污染解除。从图10(b)可以看出,相对湿度和地表温度具有显著的日变化特性。温度在下午2:00-4:00达到当天峰值,此时相对湿度最低(其中15日上午11:00到达谷值,此后呈上升趋势,并最终在16日凌晨5:00到达峰值94%,15日平均相对湿度为77%,高湿度能够促进粉尘等细颗粒物的吸湿性增长。对比图10(a)(b)可以得出,污染期间风速较低,小风静稳的不利气象条件是本次霾污染积累的外在原因,而大风对污染物的扩散稀释起决定性作用。

图11为1月12-15日北京地区不同高度的温度分布曲线。可以看出,12日1.5~2 km和500 m以下分别出现逆温层,逆温强度高达5 $^{\circ}\text{C}$,13日逆温现象依然存在,逆温层高度和厚度发生变化,14日凌晨贴地逆温层消失,但1.5~1.8 km处逆温现象明显,强度超4 $^{\circ}\text{C}$ 。结合激光雷达消光系数时空分布(图4)可以看出,气溶胶主要在1.5 km以下积聚,逆温层使污染物很难向高空扩散。15日高层逆温层消失,1 km以上高空的大气湍流活动增强,这与地基激光雷达探测结果一致(污染物向上扩散传输)。由于15日凌晨200 m以下贴地逆温强度高达4 $^{\circ}\text{C}$,导致近地面污染扩散能力仍然较差,从图3可见,PM_{2.5}浓度有增无减。连续多日逆温层的出现抑制了气溶胶粒子在垂直方向的扩散传输。

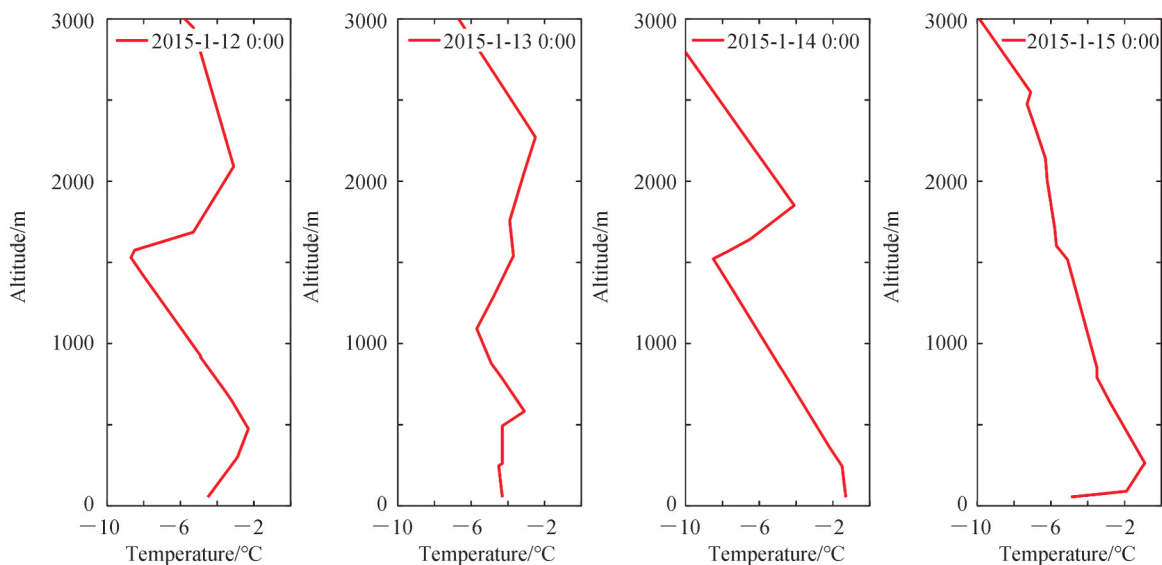


图11 2015年1月12-15日0:00北京地区不同高度温度变化

Fig. 11 Temperature variation at different altitudes in Beijing during January 12-15, 2015 at 0:00

PM_{2.5}污染物通常来自直接排放和二次生成,后者是指大气中的氮氧化物、硫氧化物和挥发性有机气体经过复杂的物理化学反应产生的二次气溶胶。NO₂、SO₂和CO主要来源于生物质、化石燃料和煤炭燃烧的排放,因此它们受本地源的影响更大^[9]。由图12(a)、(b)可见,PM_{2.5}与NO₂、CO浓度总体变化趋势一致,如均在15日下午1:00-16日上午6:00污染最严重时段出现峰值,表现出很好的同源性。这可能是由于北京地区的PM_{2.5}主要来源于二次气溶胶^[7],而后者是由NO₂等主要气态前体物转化而来。观测期间PM_{2.5}与NO₂和CO的相关系数分别高达0.766和0.901(PM_{2.5}与SO₂的相关系数仅为0.119),呈显著性相关(见图13)。图12(a)为CO、边界层高度与PM_{2.5}颗粒物浓度的时间序列图。图中可以看出,观测期间,由激光雷达数据反演的边界层高度与地面监测站观测的PM_{2.5}浓度总体上呈相反变化趋势,边界层高度在污染最严重的16日凌晨仅为500 m,而在污染解除后的16日下午则高于3 km。CO是化石燃料不完全燃烧导致的,来源广泛,如燃料燃烧,交通工具排放的尾气,工厂排出的烟尘等。

有研究指出,氮氧化物、硫氧化物等主要气态污染物能转化为二次气溶胶,导致PM_{2.5}的爆发性和持续性增长^[25]。图12(b)是1月11-17日NO₂、SO₂与PM_{2.5}浓度的时间变化图。污染期间,NO₂峰值大多在下午6:00-晚上9:00出现(15日峰值出现在下午2:00)。1月11-12日,NO₂分别在上午和中午时出现小高峰,其他几天主要为单峰特性。NO₂是机动车尾气的主要排放物,但此次NO₂浓度与人们通勤时早晚交通高峰时间不同,没有出现明显的双峰特性,说明本地机动车尾气排放并非污染的单一排放来源。SO₂是北方冬季取

暖季燃煤的主要排放气体,随着北京市“煤转气”“煤转电”等能源转型政策的实施,SO₂的排放得到有效控制。

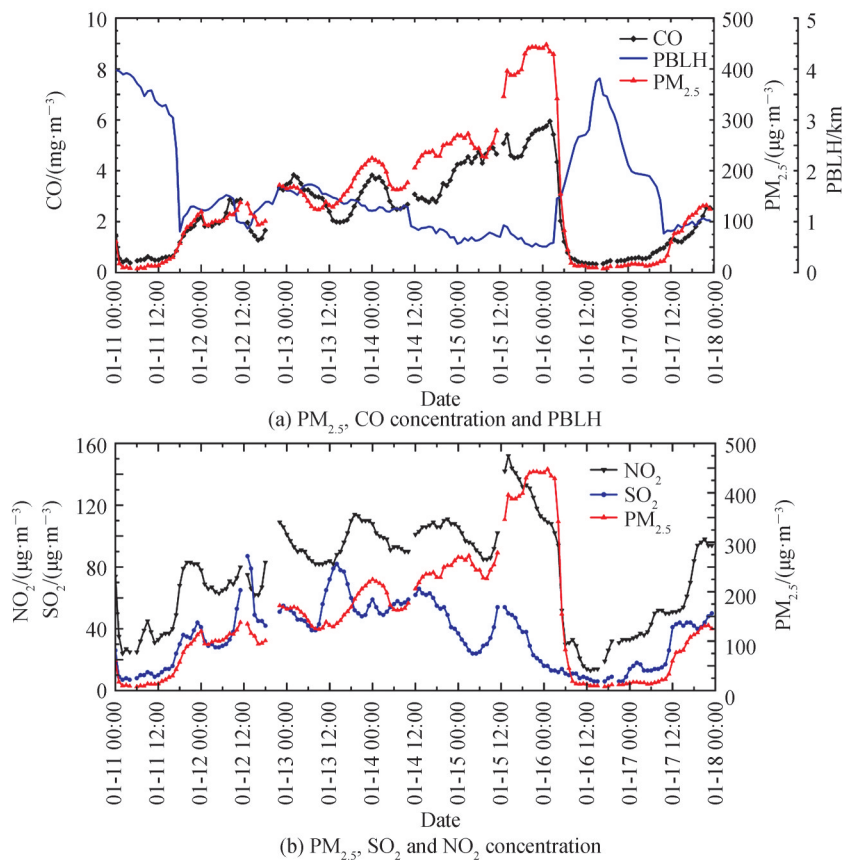


图 12 2015 年 1 月 11-17 日污染气体浓度和边界层高度

Fig. 12 Concentration of pollutant gas and planetary boundary layer height from January 11-17, 2015

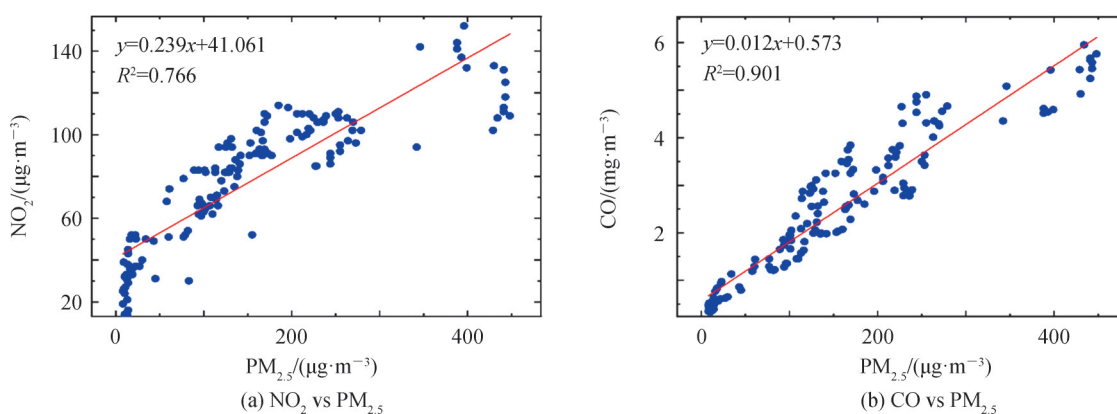


图 13 2015 年 1 月 11-17 日 PM_{2.5} 与 NO₂ 和 CO 的线性拟合图

Fig. 13 Linear fitting chart of PM_{2.5} and NO₂, CO on January 11-17, 2015

3 结论

本文针对 2015 年 1 月 11-17 日北京地区发生的一次连续霾污染事件进行分析,利用地基和星载激光雷达联合观测污染物的垂直分布特征,基于 MODIS 遥感数据和 HYSPLIT 后向轨迹模式研究霾污染的可能来源和传输路径,最后结合地面气象观测数据分析得出本次污染的成因。1)地基激光雷达探测的数据根据 Fernald 算法可反演得到气溶胶消光系数,进而获取观测点气溶胶的高精度垂直分布特征,星载激光雷达提供的衰减后向散射系数和气溶胶类型时空分布进一步辅助验证了霾污染的变化特性。此外双波长激光雷

达可定性观测气溶胶的相对粒径大小,而基于梯度法反演的气溶胶边界层高度则为污染成因及污染物浓度的变化分析提供了依据。2)MODIS遥感数据显示,污染初期气溶胶光学厚度高值区从河南西部、山西南部等地区向东北方向转移,1月13日北京及周边的南部地区AOD峰值超过1.0。HYSPLIT气团后向轨迹进一步证实了污染气团主要来自北京西南方向的河北南部及河南、山西等地的远距离输送。观测期间,连续多日逆温层(逆温强度高达5℃)的出现使得污染物在垂直方向上扩散能力较差,而污染期间的小风静稳天气则抑制了气溶胶粒子在水平方向的扩散流动,两者共同导致气溶胶的持续积累。16日的大风(最大风速6.30 m/s)对霾污染的稀释扩散起决定性作用,使污染快速解除。通过分析地面空气质量数据发现,PM_{2.5}与NO₂、CO的相关系数分别为0.766、0.901,呈显著正相关,说明NO₂等气态前体物转化而来的二次气溶胶是本次霾污染的重要组成部分。

综合以上分析得出,霾污染是由外地传输和局地排放的污染物叠加而成。局地污染可能来自于北京及周边地区的工厂排放、机动车尾气、生物质及化石燃料燃烧。而来自北京西南方向的河北南部及河南、山西等地污染气溶胶经高空传输后,与本地污染粒子混合,导致污染加重。

参考文献

- [1] COLBECK I, LAZARIDIS M. Aerosols and environmental pollution[J]. *Naturwissenschaften*, 2010, 97(2): 117-131.
- [2] CEOLATO R, BERG M J. Aerosol light extinction and backscattering: A review with a lidar perspective[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2021, 262: 107492.
- [3] KAUFMAN Y J, TANRE D, BOUCHER O. A satellite view of aerosols in the climate system[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 215-223.
- [4] POSCHL U. Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2005, 44(46): 7520-7540.
- [5] QIU Yun, LI Lingjun, JIANG Lei, et al. Analysis of a pollution process in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on satellite and surface observations[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(3): 1111-1119.
邱响,李令军,姜磊,等.京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1111-1119.
- [6] SONG Yu, TANG Xiaoyan, FANG Chen, et al. Source apportionment on fine particles in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(6): 11-16.
宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市大气细粒子的来源分析[J]. *环境科学*, 2002, 23(6): 11-16.
- [7] HUANG Rujin, ZHANG Yanlin, BOZZETTI Carlo, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [8] TANG Aohan, ZHAO Jingxian, HAN Wenxuan, et al. Progress on studies of the chemical characteristics of haze in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(3): 185-191.
唐傲寒,赵婧娴,韩文轩,等.北京地区灰霾化学特性研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(3): 185-191.
- [9] YAN Renchang, YU Shaocai, ZHANG Qingyu, et al. A heavy haze episode in Beijing in February of 2014: Characteristics, origins and implications[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6(5): 867-876.
- [10] QIN Kai, WU Lixin, WONG Mansing, et al. Trans-boundary aerosol transport during a winter haze episode in China revealed by ground-based Lidar and CALIPSO satellite[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 141: 20-29.
- [11] YANG Hao, XIE Chenbo, FANG Zhiyuan, et al. Joint observations of vertical distribution of aerosols in Hefei area by spaceborne and ground-based lidars[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0110001.
杨昊,谢晨波,方志远,等.星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0110001.
- [12] TAN Min, XIE Chenbo, WANG Bangxin, 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.
- [13] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations—some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [14] FANG Zhiyuan, YANG Hao, CAO Ye, et al. Study of persistent pollution in Hefei during winter revealed by ground-based LiDAR and the CALIPSO Satellite[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 1-14.
- [15] ZHANG Chaoyang, SU Lin, CHEN Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in china[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳,苏林,陈良富.中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.
- [16] 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.
- [17] REMER L A, KAUFMAN Y J, TANRE D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(4): 947-973.
- [18] ZHANG Ying, LI Zhengqiang. Remote sensing of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) mass concentration near the ground from satellite observation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 252-262.
- [19] WANG Xiaoming, YUN Tian, ZHANG Zhiyong, et al. Analysis on synoptic and climatic features of temperature inversion under different conditions of geographical environment in winter[J]. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(8): 91-97.

- 王晓明, 云天, 张智勇, 等. 吉林省冬季逆温天气特征分析[J]. 气象, 2009, 35(8): 91-97.
- [20] ROLPH G, STEIN A, STUNDER B. Real-time Environmental applications and display system: READY [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 95: 210-228.
- [21] Ambient air quality standards [EB/OL]. (2012.2.29) [2021.8.1]. <http://img.jingbian.gov.cn/upload/CMSjingbian/201806/201806210853050.pdf>.
- [22] TAO Zongming, ZHANG Yinchao, LIU Xiaoqin, et al. Iteration method for the inversion of simulated multiwavelength lidar signals to determine aerosol size distribution[J]. Chinese Physics, 2004, 13(3): 409-412.
- [23] HALLEN H D, PHILBRICK C. Russell: Lidar detection of small aerosol size distribution[C]. Conference on Laser Radar Technology and Applications XXIII, 2018.
- [24] XU Xiaobin. Observational study advances of haze and photochemical pollution in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5): 604-619.
- [25] WANG Yuesi, YAO Li, WANG Lili, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. Science China-Earth Sciences, 2014, 57(1): 14-25.

Observation and Analysis of a Haze Pollution Event in Beijing by Spaceborne and Ground-based Lidars

CHENG Liangliang^{1,2,3,4}, XIE Chenbo^{1,3}, YANG Hao^{1,2,3}, FANG Zhiyuan^{1,2,3}, ZHAO Min^{1,3},
DENG Xu^{1,2,3}, WANG Bangxin^{1,3}, XING Kunming^{1,3}

(1 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

(4 Anhui Province Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System, Hefei Normal University, Hefei 230601, China)

Abstract: Taking the continuous haze pollution process that occurred on January 11-17, 2015 in Beijing as an example, the vertical distribution characteristics of aerosols were obtained by inversion using joint observations of ground-based and space-borne lidar. The pollution sources and transport paths were derived from MODIS satellite remote sensing data and HYSPLIT backward trajectory model analysis, after which the causes of this pollution were revealed by combining ground-based air quality and meteorological observation data. The results show that the near-surface aerosol extinction coefficients inferred from lidar data are generally consistent with the variation of PM_{2.5} concentrations on the ground, while the planetary boundary layer height shows an opposite trend to PM_{2.5} concentrations, and the lowest boundary layer height is 500 m. During the pollution period, it is light wind and high humidity, and the average wind speed and relative humidity are 1.35 m/s and 66%, respectively. The presence of the inversion layer for several days inhibited the diffusion and transport of pollutants in the vertical space, and the intensity of the inversion was as high as 5°C. These two factors led to the continuous accumulation of pollutants, and finally, the PM_{2.5} concentration reached 448 μg/m³ in the early morning of the January 16th, and the pollution was finally disappeared because of the southerly wind on the January 16th, and the PM_{2.5} concentration decreased at a rate of 82 μg/(m³·h). During the observation period, the correlation coefficients of PM_{2.5} with NO₂ and CO were 0.766 and 0.901, respectively, showing a significant positive correlation, which shows that secondary aerosols from the transformation of gaseous precursor pollutants such as NO₂ are an important source of haze. Comprehensive analysis shows that this pollution is dominated by haze, which is caused by the superposition and accumulation of aerosols from regional transmission and local emissions. Pollutants from southern Hebei, Henan and Shanxi are transmitted to Beijing with high-altitude air masses and mixed with locally emitted pollution aerosols, leading to increased pollution.

Key words: Pollution; Lidar; Aerosol boundary layer; CALIPSO; MODIS; Backward trajectory

OCIS Codes: 010.3640; 280.3640; 280.1100

Foundation item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA17040524), Civil Aerospace Technology Advance Research Project (No.D040103), Key Program of 13th 5-year Plan, CASHIPS (No.KP-2019-05), 2019 Anhui Province Science and Technology Major Project (No.201903c08020013), Anhui Province Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System Project (No.2020ZDSYSYB05), 2020 Hefei Normal University Provincial Research Platform Project (No.2020PT12)