

机载激光雷达探测京津冀地区气溶胶的空间分布

伯广宇 谢晨波* 王邦新 吴德成 钟志庆

中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 利用一台研制的机载双波长米氏散射激光雷达,对京津冀地区大气气溶胶的三维空间分布进行了探测。给出了其中一次较典型的观测实验,该架次航线与边界层内的气流方向垂直,有利于获取区域尺度上气溶胶分布的剖面信息。观测结果显示,京津冀腹地密集的污染排放源,结合气流对气溶胶的输送和扩散作用,导致观测期间该地区形成了大范围区域立体污染。通过分析典型污染源周边的气溶胶分布,研究了重污染源排放的气溶胶随气流扩散的过程。初步的飞行实验结果表明,该激光雷达性能稳定,可以为污染源的识别以及污染物传输路径的探测提供高空间分辨率的数据。

关键词 大气光学;气溶胶;航空遥感;激光雷达;空间分布;光学参数

中图分类号 TN 958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0901007

Observational Study of Aerosol Distribution over Jing-Jin-Ji Area Using Airborne Lidar

Bo Guangyu Xie Chenbo Wang Bangxin Wu Decheng Zhong Zhiqing

Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract An airborne two-wavelength polarization Mie lidar is designed for detecting three-dimensional (3-D) distributions of atmospheric aerosols at Jing-Jin-Ji area. One typical field campaign is described. The flight path is perpendicular to the airstreams, which makes it ideal for observation of aerosol 3-D structure on the flight path. The observation result of the aerosol distribution during the flight shows that regional three-dimensional air pollution has formed around Jing-Jin-Ji area, due to densely pollutant source and air-flow diffusion. The diffusion process of the aerosol emission from one typical heavy pollution source is given using the aerosol distribution data around it. The preliminary result shows that this airborne lidar provides a unique airborne remote sensing platform for monitoring the aerosol distribution over a wide region.

Key words atmospheric optics; aerosol; airborne remote sensing; lidar; spatial distribution; optical parameter

OCIS codes 010.3640; 010.1110

1 引言

我国大气环境状况现阶段面临的问题是,雾霾已经成为一种频发的环境灾害事件。针对雾霾事件频发的现状,雾霾的危害、形成机制和预报已经引起了人们的空前重视^[1]。大气污染物的排放、传输和聚积是灰霾事件发生的必要条件之一,为了跟踪大气污染物的排放、传输和聚积过程,环保和气象部门需要在区域空间尺度上开展对气溶胶分布的观测研究。为了满足上述需求,业务部门已经建立了若干地基观测站点,发挥了应有的作用,地基布网观测存在的不足之处是其观测数据受地域和网点数量的局限。在现有的各种观测技术中,激光雷达与飞机或卫星等移动平台相结合,是获取区域尺度上气溶胶三维空间分布(垂直、水平和时间)最有效

收稿日期: 2015-04-01; 收到修改稿日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(41205019)、国家973计划(2010CB950800)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206037-09, GYHY201106002-03)

作者简介: 伯广宇(1980—),男,博士,副研究员,主要从事气溶胶光学特性方面的研究。E-mail: boguangyu@sohu.com

*通信联系人。E-mail: cbxie@aiofm.ac.cn

的手段。相比较于星载激光雷达,机载激光雷达可以对污染源、污染传输路径以及大气环境的突发事件等进行快速响应探测,并且可以同时兼顾信噪比和空间分辨率,因而可以作为星载激光雷达的有效补充^[2]。针对机载激光雷达的这些技术优势,国外已经研制了若干类型的机载大气探测激光雷达^[3-5],国内也正在积极开展这方面的研究工作,在“十一五”期间,国家“航空遥感系统”支持了机载双波长米氏散射激光雷达(以下简称机载激光雷达)的研制工作。

京津冀地区是我国大型城市和工业聚集区,大气污染相对严重,该区域近年来雾霾事件频发,已经对社会经济和人们的生活产生了严重的影响^[6]。京津冀地区的污染源主要由钢铁、火电、水泥、炼油等工业,以及人口密集的城市群、机动车等构成。利用机载激光雷达开展污染源及其周边气溶胶空间分布的探测,可以为建立污染源排放清单、研究污染传输规律以及灰霾预警提供观测数据。本文对一台国产机载激光雷达系统结构、主要技术参数进行了简要介绍,主要报道了一次针对京津冀地区大气溶胶分布的观测实验,利用机载激光雷达获取的数据,分析了京津冀地区气溶胶的时空分布以及典型污染源周边气溶胶的扩散规律。

2 机载激光雷达和数据处理方法

2.1 机载激光雷达

用于机载激光雷达的主要探测方法有米氏散射技术和高光谱分辨率技术。相对于高光谱分辨率激光雷达,米氏散射激光雷达的接收光路相对简单,光学透射率较高,同时米氏散射激光雷达的体积和功耗可以满足小型载机的使用要求,可以大大提高飞行的效费比。在机载激光雷达重点关注气溶胶时空分布的设计指标要求下,选择了成熟的米氏散射探测技术。图1为机载激光雷达的结构框图。激光器发射的532 nm和1064 nm单脉冲能量均为100 mJ,重复频率为20 Hz。考虑到体积和重量的要求,接收望远镜的接收口径不宜过大,在满足信噪比仿真结果要求的前提下^[2],望远镜的口径设计为200 mm。通过分析激光雷达实测大气回波信号得出,该型激光雷达几何因子影响区域小于400 m。

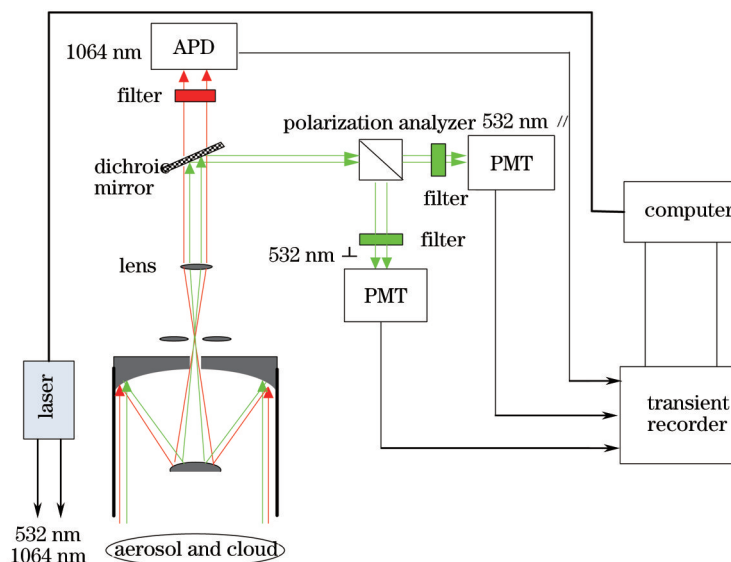


图1 机载激光雷达结构框图

Fig.1 Schematic diagram of airborne lidar

望远镜接收到的大气回波信号经分光镜使532 nm和1064 nm的光信号分离,1064 nm波长信号被雪崩光电二极管探测器(APD)接收,532 nm波长信号经检偏棱镜后,分为垂直和平行2个通道,分别由光电倍增管(PMT)接收。光电转换后的电信号由瞬态记录仪采集后交由控制计算机处理。探测数据的垂直分辨率为7.5 m,水平分辨率约为61 m(每秒保存一组文件,使用运12型运输机,以220 km/h速度飞行)。

2.2 数据处理方法

机载激光雷达的工作模式为天底指向,使用Fernald前向积分方法反演气溶胶的后向散射系数^[7]。机载激光雷达的数据反演过程中,面临着与美国宇航局云气溶胶激光雷达和红外探路者观测卫星(CALIPSO)星

载米氏散射激光雷达相同的问题,即需要假设气溶胶的激光雷达比信息^[8]。由于激光雷达比与气溶胶的尺度谱分布、复折射率和形态等因素有关,同时还受大气水汽、温度和风场等外因的影响,因而在数据反演的过程中,激光雷达比的假设值与实际值之间的差别是主要的误差来源。但是机载激光雷达的主要技术优势是在大空间尺度上摸排污染源、跟踪气溶胶的传输和扩散,在重点研究气溶胶空间分布的前提下(利用与星载激光雷达相同的处理方法,通过分析校正后的大气回波信号变化特征,即可实现该目标),客观存在的光学参数反演误差是可以接受的^[7]。

3 观测数据

3.1 航线上气溶胶的三维空间分布

该激光雷达先后参加了2011、2013和2014年3次外场飞行实验,累积了京津冀地区约20 h的飞行探测数据。其中,在2014年9月份,机载激光雷达作为主要观测仪器之一,参加了973项目“多尺度气溶胶综合观测和时空分布规律研究”实验,本文分析了其中较为典型的1个架次的飞行数据。该架次覆盖的区域如图2(a)所示,飞机由通州机场起飞,设定的航线(红线)穿过京津冀地区的腹地,并且往返航线相同,航线上有针对性的选择了城市、工业区和海港地区等潜在污染源。设定航线上的主要城市和污染源有1)天津市宝坻城区,主要污染源为机动车、轻工业生产和燃煤;2)河北省唐山市,为华北钢铁企业集中的地区,一座千万吨级的钢铁厂位于航线上;3)河北省曹妃甸工业区,位于渤海湾中心地带,包括钢铁、热电等大型工业。图2(b)给出了利用拉格朗日混合单粒子轨道(HYSPLIT)模式^[9]获得的航线上空500、1100、1800 m气层的24 h气流后向轨迹追踪,结果显示,气流主要从西南向东北传输,其中宝坻上空的气流经过天津和廊坊一带,相应高度上随气流传输的污染物,以工业、城市机动车排放的污染颗粒物和痕量气体为主,而唐山和曹妃甸的气流,则来自渤海海面 and 沿海地区,应当包含海洋型气溶胶粒子。值得注意的是本次飞行实验期间,边界层内气流的传输方向与航向基本垂直,非常有利于探测该区域内气溶胶三维空间分布的剖面信息。

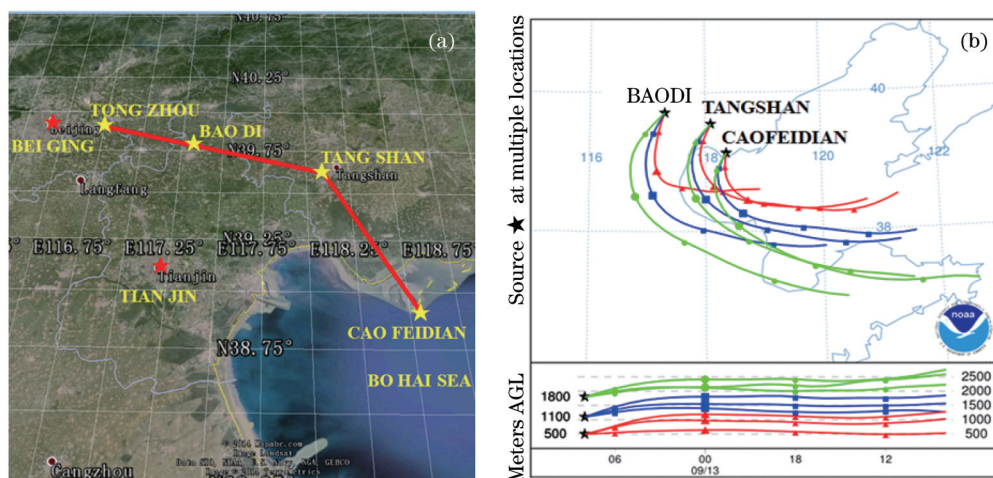


图2 (a) 2014年9月13日飞行航线; (b) 气流后向追踪

Fig.2 (a) Flight path on 13 Sept., 2014; (b) backward trajectories

由于起飞和降落阶段飞行高度较低,且起飞和降落航线均穿过人口密集的城区,为了确保地面人眼的安全,激光雷达关机,本架次获得的有效数据的时间段为06:00~08:00(世界时)之间。观测过程中载机的飞行速度保持在220 km/h,去程飞行高度保持在3300 m,回程飞行高度保持在3600 m。载机配有高精度定位定向系统,用于获取飞行高度、GPS信息和飞机姿态等数据。图3给出了激光雷达532 nm波长距离平方校正回波信号,该图反映航线上被测气溶胶空间分布情况,其中纵坐标给出了地表至2.5 km高度的距离平方校正回波信号(在激光雷达几何因子影响区域之外),横坐标为时间。作为地理位置的参考,图3中标注的A点为宝坻城区,B点为唐山城区,C点为曹妃甸工业园。图3(a)和图3(b)分别为去程和回程探测结果,每幅图覆盖的水平空间尺度约180 km。对比图3(a)和图3(b)中气溶胶的空间分布可以发现,由于往返航线相同,且时间间隔在2 h以内,因此,两图所反映的气溶胶空间分布相似。

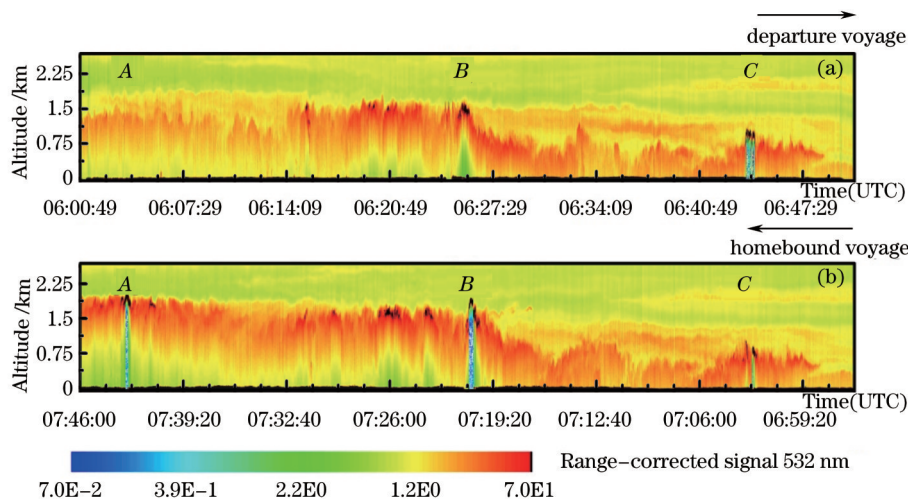


图3 航线上的气溶胶空间分布

Fig.3 Aerosol distribution on the flight path

地面污染源排放的各种大气污染物,主要在边界层内扩散,因此边界层高度对气溶胶分布有着重要的影响,关于区域大空间尺度上边界层高度分布的观测报道,目前还不多见。根据图3给出的激光雷达距离平方校正信号,可以判断航线上边界层高度的变化情况。结果可见:在从内陆过渡到沿海的过程中(A点至C点方向),边界层高度整体上从约1.9 km下降至约1.5 km;虽然下垫面经历了城市和农田交替变化的过程,但是边界层高度却没有因为下垫面的变化而出现明显变化。

图3气溶胶的垂直分布信息显示,在A点至B点所覆盖的区域,大气边界层在垂直方向上的气流作用强烈,导致污染物向上输送的效果明显,形成了从近地面到边界层顶的垂直污染现象,由于大气逆温的抑制作用导致气溶胶积聚在边界层顶附近,该现象在由B点至A点的返航航线上尤其明显。从B点至C点边界层内的垂直气流相对较弱,气溶胶的垂直分布主要集中在近地面至1 km的高度范围内。图3所示气溶胶的水平分布数据显示:A点至B点气溶胶的水平分布差别不大,即使在两点之间的乡村地区,气溶胶含量同样非常丰富;虽然B点至C点气溶胶的水平分布结构相对复杂,但是两点之间的乡村地区气溶胶含量也较为丰富。

由于本次观测期间,边界层内的气流基本垂直于航向,因而获得的数据可以代表气溶胶三维空间分布的剖面信息,观测结果表明,该地区密集的污染源排放的颗粒物,在气流的作用下充分混合和扩散,导致京津冀腹地已经形成了大范围的区域立体污染。值得注意的是,航线上个别空域出现了激光无法穿透边界层顶的现象,有趣的是上述空域均位于在A、B和C点3个污染源上空,下面将以B点为例分析典型污染源周边气溶胶的空间分布及光学参数探测结果。

3.2 典型污染源周边气溶胶的分布及光学参数

B点出现疑似层云的位置,恰好是一座千万吨级的钢铁厂(118.101°E, 39.539°N)的上空,图4(a)给出了拍摄于2014年4月30日的谷歌地图影像,从图中可以清晰的看到该污染源的排放场景。图4(b)给出了钢铁厂上空的一条激光雷达回波信号(扣除背景噪声),可见激光仅穿透了约500 m的疑似层云。

米氏散射激光雷达反演气溶胶后向散射系数,需要已知气溶胶的激光雷达比,为了提高数据反演的精度,在重点关注的A、B和C3个污染源上,均布置了CE318型太阳光度计,利用太阳光度计反演得到532 nm激光雷达比^[10],代入激光雷达反演算法,计算气溶胶的后向散射系数。表1给出了太阳光度计探测的激光雷达比(时间与飞行实验同步),分析3个地面站点的激光雷达比可知,从内陆至沿海激光雷达比依次减小,说明A点所在的内陆地区以污染小粒子为主,而C点所在的沿海地区中可能包含了粒径较大的海盐粒子。1064 nm波长的激光雷达比则按照污染型气溶胶类型取固定值30 sr。

图5给出了激光雷达反演得到的532 nm后向散射系数(β)的剖面图,该图覆盖了钢铁厂左右各约5 km水平尺度的气溶胶分布情况,由于该范围的水平空间跨度较小,认为气溶胶的类型和气象条件相似^[11],则激光雷达数据反演时,可以使用B点处测量的激光雷达比,代表该区域内的激光雷达比信息。分析图5的数据可见,气溶胶分布主要集中在边界层内,并且边界层顶处的气溶胶后向散射系数,较边界层内减少1个数量级

以上。边界层内气溶胶的后向散射系数最大值约为 $0.02 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ (蓝框内数据受疑似层云的干扰,故反演数据不准确,因此不考虑蓝框内的数据),若取激光雷达比为 54.4,则消光系数最大值达到了 1.09 km^{-1} 。

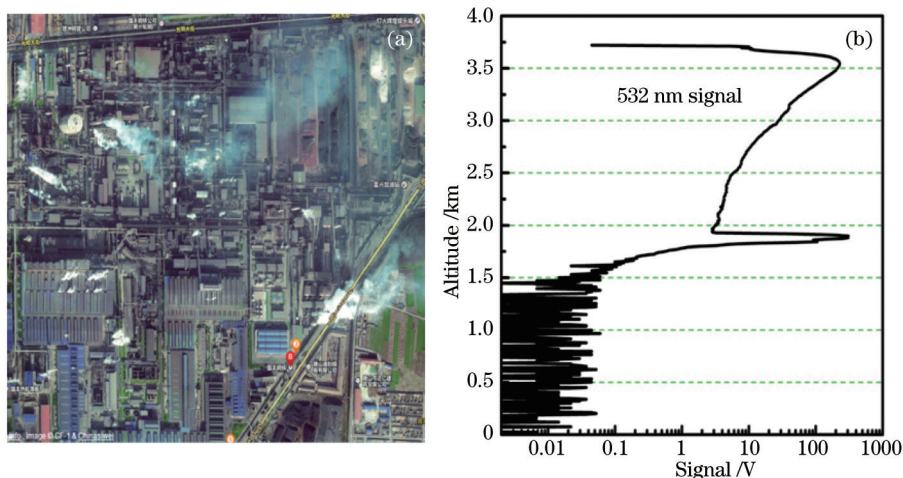


图 4 (a) 钢铁厂(118.101°E,39.539°N)的谷歌地图影像;(b) 钢铁厂上空典型的激光雷达回波信号
Fig.4 (a) Google earth image of the iron smelter (118.101°E, 39.539°N); (b) lidar signal over the iron smelter

表 1 飞行期间太阳光度计观测的 532 nm 激光雷达比

Table 1 Lidar ratio at 532 nm obtained from sun photometer during the flight

| Observation site | Average lidar ratio sr | Coordinate of the observatory |
|----------------------|------------------------|-------------------------------|
| Baodi (point A) | 67.1 ± 9.9 | (117.298°E, 39.709°N) |
| Tangshan (point B) | 54.4 ± 14.9 | (118.096°E, 39.546°N) |
| Caofeidian (point C) | 50.6 ± 7.8 | (118.511°E, 39.004°N) |

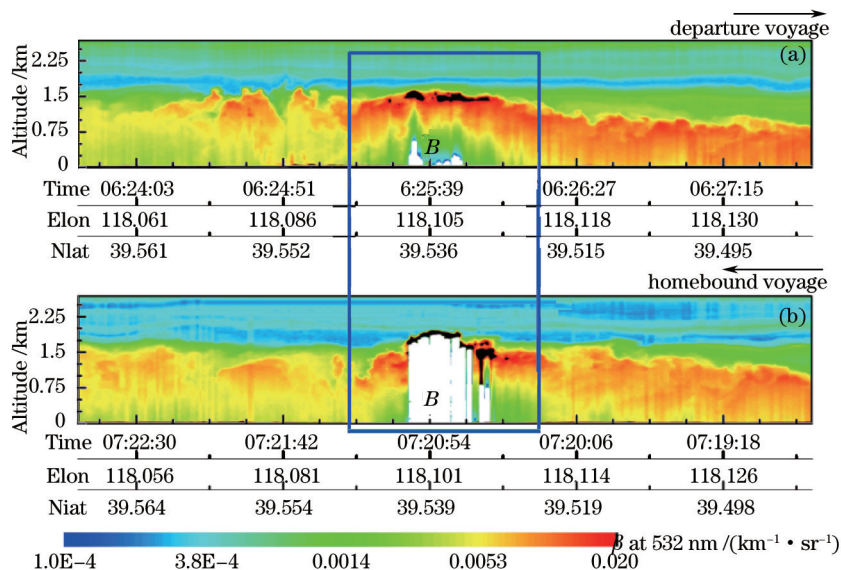


图 5 B 点附近后向散射系数垂直廓线分布

Fig.5 Backscatter coefficient profiles around point B

在往返航线上, B 点边界层顶附近均出现了疑似层云的现象,如图 5 蓝框内数据所示,该区域的空间宽度约为 3 km,其对激光强烈的衰减作用,导致边界层顶以下无法反演出后向散射系数的有效的结果。引起这种现象的原因可能是,冶炼厂作为明显的热源,会引起其上空气流的抬升,导致颗粒物随之抬升,并聚积在边界层顶,当遇到大气水汽充沛的条件,粒子将会作为凝结核,在边界层顶附近形成了层云。在离开污染源的空域,气溶胶随着气流的下沉而沉降,并逐渐扩散开。

图 6 给出了 B 点周围气溶胶退偏振比和波长指数的统计结果(蓝色框内的数据受疑似层云的干扰,无法

得出有效的反演结果),考虑到 1064 nm 波长信噪比等因素(当大气以污染型小粒子为主时,由于粒子和波长的尺度参数关系,1064 nm 波长的信噪比低于 532 nm 波长),这里采用气层平均的方法,分析气溶胶的光学参数^[2],认为边界层内气溶胶混合的较均匀,统计边界层内每条退偏振比和波长指数垂直廓线的平均值。

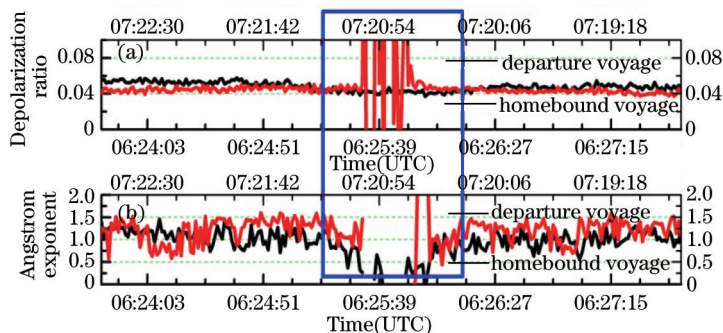


图 6 B 点附近气溶胶的光学参数。(a) 退偏振比; (b) 波长指数

Fig.6 Aerosol optical properties in the vicinity of point B . (a) Depolarization ratio; (b) Angstrom exponent

从图 6 可知,观测期间 B 点附近边界层内气溶胶的退偏振比基本相同,其大小为 0.05 左右,退偏振比的观测结果与已有的污染型气溶胶观测报道一致^[13],显示该区域内气溶胶的粒形更加偏向于球形。气溶胶的散射波长指数分布在 1.2 左右,并且波长指数整体上变化不大,图中波长指数的振荡与 1064 nm 波长信号信噪比有关系。退偏振比和波长指数的观测结果表明,污染源周边气溶胶的退偏振比和波长指数变化不大,显示污染源周边气溶胶的类型基本相同,应当以偏向于球形的污染型细粒子为主。

4 结 论

利用研制的双波长米氏散射激光雷达在京津冀地区开展了飞行观测实验,通过一例典型的观测结果展示了机载激光雷达对污染源的识别以及气溶胶传输路径的探测能力。结果表明,观测期间京津冀地区密集污染排放,以及气流对污染颗粒物的混合、扩散作用,使得该地区已经形成了大范围的区域立体污染。针对空对地探测米氏散射激光雷达采用 Fernald 前向积分法反演后向散射系数时易受激光雷达比的影响的问题,采取了在重点关注的污染源附近设置地基太阳光度计获取激光雷达比的方法提高激光雷达对气溶胶后向散射系数的反演精度。利用典型污染源附近的气溶胶分布数据分析了重污染源排放的气溶胶随气流扩散的过程以及污染源周边的气溶胶后向散射系数、退偏振比和波长指数的探测结果。

参 考 文 献

- 1 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze weather[J]. Chinese J 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.
- 2 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014002.
伯广宇,刘东,王邦新,等.探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J].中国激光,2012,39(10):1014002.
- 3 Flamant C, Pelon J, Chazette P, *et al.*. Airborne lidar measurements of aerosol spatial distribution and optical properties over the Atlantic Ocean during a European pollution outbreak of ACE-2[J]. Tellus Series B, 2000, 52(2): 662-677.
- 4 M McGill, D Hlavka, W Hart, *et al.*. Cloud physics lidar: Instrument description and initial measurement results[J]. Applied Optics, 2002, 41(18): 3725-3734.
- 5 F Dulac, P Chazette. Airborne study of a multi-layer aerosol structure in the eastern Mediterranean observed with the airborne polarized lidar ALEX during a STAAARTE campaign (7 June 1997)[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, 3: 1817-1831.
- 6 Wang Yuesi, Yao Li, Liu Zirui, *et al.*. Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 353-363.
王跃思,姚利,刘子锐,等.京津冀大气霾污染及控制策略思考[J].中国科学院院刊,2013,28(3):353-363.
- 7 Liu Houtong, Chen Liangfu, Su Lin. Theoretical research of Fernald forward integration method for aerosol backscatter coefficient

- inversion of airborne atmosphere detecting lidar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 064204.
- 刘厚通, 陈良富, 苏 林. Fernald前向积分用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的理论研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 064204.
- 8 Yu Nana. Cloud-Aerosol Satellite Borne Lidar Data Retrieval Algorithms Preliminary Study[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 45-46.
- 于娜娜. 气溶胶/云星载激光雷达数据反演算法初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 45-46.
- 9 R R Draxler, G D Rolph, Hysplit (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model[OL]. 2003, NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD.<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>.
- 10 J F Léon, Y Derimian, I Chiapello, *et al.*. Aerosol vertical distribution and optical properties over M' Bour (16.96°W; 14.39°N), Senegal from 2006 to 2008[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(23): 9249-9261.
- 11 N G Loeb, G L Schuster. An observational study of the relationship between cloud, aerosol and meteorology in broken low-level cloud conditions[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2008, 113(D14): D14214.
- 12 Cai Hongke. The Optical Features in the Transition Zone Between Cirrus and Clear-sky over Eastern Mainland and Adjacent Seas of China[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 45-46.
- 蔡宏珂. 中国大陆东部和近海卷云-晴空大气过渡带的光学特征[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 45-46.
- 13 C W Chiang, W N Chen, W A Liang, *et al.*. Optical properties of tropospheric aerosols based on measurements of lidar, sun-photometer, and visibility at Chung-Li (25°N, 121°E)[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(19): 4128-4137.

栏目编辑: 史 敏