

# 多波长气溶胶激光雷达观测北京地区持续性 雾霾的典型实例

庄全风<sup>1</sup>, 王一萌<sup>2</sup>, 王章军<sup>1\*</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 刘军礼<sup>1</sup>, 刘兴涛<sup>1</sup>, 孟祥谦<sup>1</sup>, 王秀芬<sup>1</sup>

<sup>1</sup>齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001;

<sup>2</sup>中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**摘要** 为了解雾霾天气条件下大气气溶胶的光学特性, 利用多波长气溶胶激光雷达在北京海淀气象局的观测数据, 反演得到了 2017 年 11 月 4 日至 7 日持续性雾霾期间大气气溶胶的消光系数、退偏振比和雾霾高度等参数, 实现了在雾霾期间对大气的实时监测。结合探空资料数据获取的气象参数, 并利用拉格朗日混合单粒子轨迹模式(HYSPLIT)分析了雾霾期间气团的路径来源和走向, 分析得出, 相对湿度增大、风速低以及逆温层的存在是雾霾形成和持续存在的重要因素。河北一带的污染物输送导致此次北京海淀区的雾霾形成, 而西北风为污染物向上扩散消失提供了条件。

**关键词** 大气光学; 多波长气溶胶激光雷达; 雾霾; 气溶胶光学特性; 气象参数; 后向轨迹追踪

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.240101

## Typical Case of Multi-Wavelength Aerosol Lidar Observation of Persistent Hazy Weather in Beijing

Zhuang Quanfeng<sup>1</sup>, Wang Yimeng<sup>2</sup>, Wang Zhangjun<sup>1\*</sup>, Chen Chao<sup>1</sup>,  
Li Hui<sup>1</sup>, Liu Junli<sup>1</sup>, Liu Xingtao<sup>1</sup>, Meng Xiangqian<sup>1</sup>, Wang Xiufen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences,*

*Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao, Shandong 266001, China;*

<sup>2</sup>*Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China;*

**Abstract** The extinction coefficient, depolarization ratio, and haze height of atmospheric aerosols during hazy weather are used to realize real-time atmospheric monitoring and study the optical characteristics of aerosols in hazy weather conditions. These characteristics are retrieved based on the observation data obtained from a multi-wavelength aerosol lidar at the Haidian Meteorological Bureau in Beijing, China, from November 4 to 7, 2017. Combining these characteristics with the meteorological parameters obtained from the sounding data, the air mass source and direction during hazy weather conditions are analyzed using the hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model. The analysis concludes that increased relative humidity, low wind speeds, and the presence of an inversion layer are important factors for the formation of hazy weather conditions. The transportation of pollutants through the Hebei Province influences the formation of the haze in Beijing's Haidian District, and haze dissipation is affected by the northwest wind, which provides main conditions for the upward diffusion and disappearance of pollutants.

**Key words** atmospheric optics; multi-wavelength aerosol lidar; haze; optical characteristics of aerosols; meteorological parameters; backward trajectory tracking

**OCIS codes** 010.3640; 010.1100; 280.3640; 280.1100

收稿日期: 2019-05-01; 修回日期: 2019-05-07; 录用日期: 2019-06-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400301, 2018YFC1407300)、山东省自然科学基金(ZR2017QD009, ZR2019PD023, ZR2019PD020, ZR2019PEE027)、海洋公益性行业科研专项(201505031)

\* E-mail: zhangjun.wang@hotmail.com

# 1 引言

雾霾天气严重影响了人们的出行与健康,已引起了全社会的关注。作为近地面天气现象,雾霾是地面气象观测的主要内容。近年的研究对国内雾霾污染天气已有了较深的认识,目前对雾霾天气的研究方法大多是基于单点地面监测资料和整层大气卫星观测的研究<sup>[1]</sup>。国内在雾霾研究与监测方面比较有代表性的研究工作主要有:周勇等<sup>[2]</sup>基于大数据分析研究北京雾霾的成因,并根据历史 PM<sub>2.5</sub> 浓度以及 PM<sub>2.5</sub> 浓度与全年浓度的关系预测北京 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度;孙冉等<sup>[3]</sup>以上海市 2013 年冬季一次持续雾霾为例,根据能见度和相对湿度(RH)的地面观测资料,对不同天气现象的气溶胶光学特性垂直分布特征进行了研究,并初步分析不同天气现象的转化机制;戴健等<sup>[4]</sup>利用常规地面观测资料、探空数据、大气成分数据及垂直观测资料,对北京市出现的一次雾霾天气进行分析,提出混合层高度的变化特征对雾霾发展变化有指示作用,可为雾霾预报提供参考。

随着激光雷达技术的发展,基于激光雷达观测雾霾的研究也逐渐展开。王开燕等<sup>[5]</sup>利用风廓线雷达观测灰霾日,研究结果表明灰霾有明显的季节变化,且风速对灰霾的存在起重要作用,风速越小,灰霾污染程度越严重。李菲等<sup>[6]</sup>利用空气质量综合观测仪器、微波辐射计、偏振微脉冲激光雷达系统以及风廓

线雷达观测了广州的一次霾污染,得到了不同高度风速、温度和湿度分布,研究了造成大气污染的气象背景,探讨了空气污染与气象条件之间的关系与基本规律。卜令兵等<sup>[7]</sup>利用激光云高仪数据,得出气溶胶后向散射系数时序图、消光系数廓线图以及能见度,结合探空资料等数据,分析了雾霾形成和消散过程。刘敏等<sup>[8]</sup>利用大气超级站 ALS300 型偏振 Mie 散射激光雷达对重庆主城区大气进行了连续探测,分析了 2013 年 11 月 25 日至 12 月 9 日持续污染期间的大气扩散条件及大气颗粒物时空分布等探测结果。

本文利用激光雷达实时观测数据、气象探空数据及 HYSPLIT(拉格朗日混合单粒子轨迹模式<sup>[9]</sup>) 轨迹追踪,对雾霾形成和消散过程进行综合分析,旨在全面了解雾霾形成、消散过程特征,为加强雾霾监测提供依据。

## 2 数据介绍

### 2.1 多波长气溶胶激光雷达观测数据

文中使用的激光雷达观测数据来自山东省科学院海洋仪器仪表研究所自主研发的多波长气溶胶激光雷达<sup>[10-11]</sup>,系统主要参数指标见表 1,表中 APD 和 PMT 分别表示雪崩光电二极管探测器和光电倍增管探测器。该设备可对大气中的气溶胶消光系数、后向散射系数、退偏振比、边界层高度等参数的时空分布进行探测。

表 1 多波长气溶胶激光雷达技术参数

Table 1 Technical parameters of multi-wavelength aerosol lidar

Instrument	Parameter	Specification
Transmitter subsystem	Laser type	Flash-Lamp pumped Nd : YAG laser
	Laser wavelength	355, 532, 607, and 1064 nm
	Pulse energy	80 mJ@355 nm, 50 mJ@532 nm, 100 mJ@1064 nm
	Repetition rate	20 Hz
	Divergence angle	0.15 mrad (using a 5× expander)
Receiver	Telescope	Schmidt-Cassegrain, $D=30$ cm
	Field of view	0.3 mrad
	Interference filter	1 nm (FWHM) for each wavelength
	Detectors	APD for 1064 nm; PMT for 355, 532 and 607 nm
Data acquisition and control system	Data acquisition card Height resolution	Licel transient recorder (40 MHz, 12 bit) 15 m

该激光雷达系统自 2016 年 11 月起参与中国气象局组织的大城市观测实验,并通过了其组织的对比印证,2017 年 10 月被布点到北京海淀区气象局(39°59'N, 116°17'E)进行 24 h 业务化观测。针对观测期间 2017 年 11 月 4 日至 7 日一次典型雾霾天气形成-消散过程

实时观测数据,反演得到气溶胶消光系数<sup>[12-13]</sup>、退偏振比、雾霾高度(基于归一化梯度法反演获得<sup>[14-15]</sup>)等参数,用以进行雾霾期间气溶胶光学参数的分析。

### 2.2 探空数据

使用的探空数据资料来源于美国怀俄明大学的

探空数据库 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/seasia.html>) 的北京站点 545111 探空数据, 选取北京时间为每天 08:00、20:00 的探测数据。该站点距离多波长气溶胶激光雷达观测地点约 25 km, 能够较好地体现局地大气同步特征。用到的数据包括相对湿度、温度、风速、风向廓线。

### 2.3 HYSPLIT 轨迹模式

HYSPLIT 是由美国国家海洋和大气管理局空气资源实验室 (NOAA/ARL) 联合澳大利亚气象局 (ABM), 在过去 20 年间共同研发的一种用于追踪气团传输轨迹, 计算分析大气污染物输送、扩散和沉降过程轨迹的专业模型。选取 GDAS 全球数据作为模式的输入场, 其空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。下文根据激光雷达观测结果, 选取模拟气团的时间和高度, 以此来获得气团的后向或前向轨迹追踪, 用于分析雾霾期间气团的输送情况。

## 3 结果与分析

### 3.1 多波长气溶胶激光雷达数据结果分析

图 1、图 2 为 2017 年 11 月 4 日至 7 日时间段

内, 多波长气溶胶激光雷达观测的一次持续雾霾影响, 其中, 图 1 为 532 nm 气溶胶消光系数分布图, 图中黑点对应每小时的雾霾高度, 图 2 为 532 nm 退偏比分布图。从图 1、图 2 分别可以看出, 2017 年 11 月 4 日凌晨约 02:00 开始, 1.4 km 高度附近出现浓度较高的气溶胶层, 气溶胶消光系数增大、粒子退偏振比亦增大; 此后, 该气溶胶层出现扩散且沉降, 至 12:00 层顶高度由 1.4 km 降至 1 km 附近, 伴随低空气溶胶浓度升高, 雾霾逐渐形成且持续加重; 4 日 20:00 左右起, 气溶胶浓度呈明显升高趋势, 雾霾高度亦有所增加, 至 5 日 12:00 消光系数显著增大, 污染层高度维持在 1 km 附近, 雾霾影响严重并持续存在到 7 日。可以看出, 在雾霾影响严重期间虽然消光系数保持高值, 但低空的粒子退偏振比出现低值, 这与高湿气象条件有关, 细颗粒物吸湿增长, 表现为球形粒子。7 日凌晨起雾霾高度逐渐降低, 直至 07:00 左右雾霾出现向上扩散, 浓度逐渐降低, 至 18:00 左右雾霾基本消散, 这期间退偏比值显著增大, 分布高度从地面扩散至空中 3 km 附近。这与风场影响污染物向上扩散且引起

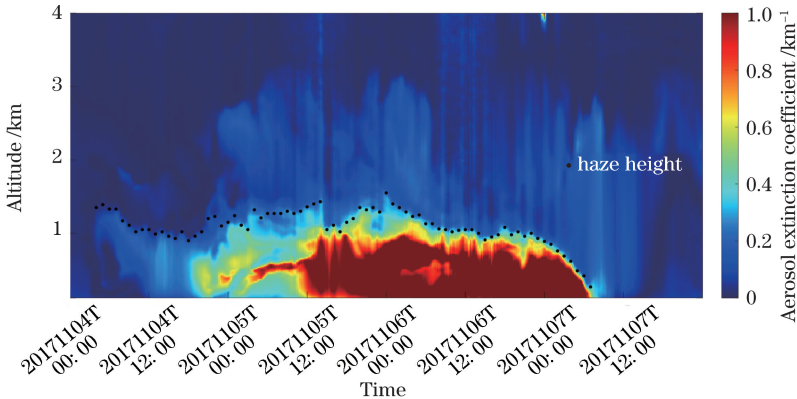


图 1 532 nm 气溶胶消光系数分布图(2017-11-04 至 2017-11-07)

Fig. 1 Distribution of aerosol extinction coefficient at 532 nm (from November 4 to 7, 2017)

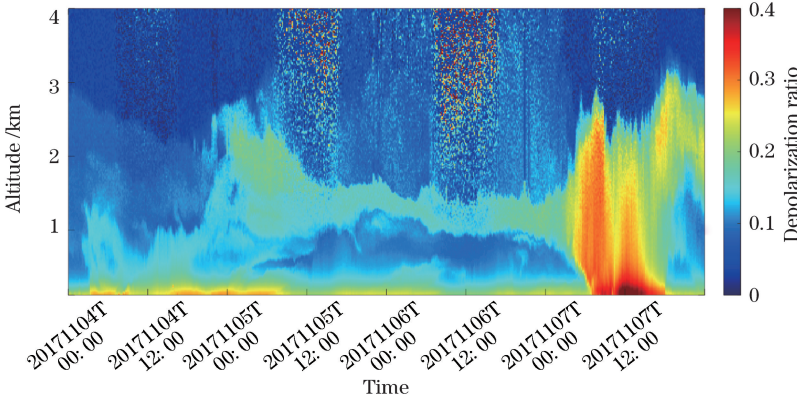


图 2 532 nm 退偏比分布图(2017-11-04 至 2017-11-07)

Fig. 2 Distribution of aerosol depolarization ratio at 532 nm (from November 4 to 7, 2017)

湿度变化有关,另外风的作用同时会引起地面扬尘,从而导致非球形粒子增多。

### 3.2 探空数据结果分析

图3为2017年11月4日至7日时间段内,由探空数据得到的不同时刻相对湿度、温度、风速、风向的高度变化廓线,图4为1,2,3 km高度相对湿度、温度、风速、风向随时间的变化曲线,可以看出雾霾期间各气象要素的变化规律。从图3、图4可以看出,4日08:00

时,风速较小,风向为西南向,在1~2 km高度范围内相对湿度较大,这与激光雷达观测到气溶胶层的存在一致。4日20:00、5日08:00、5日20:00、6日08:00及6日20:00这几个时刻对应的相对湿度、温度、风速、风向的高度变化廓线相似,该时间段内,1 km以下相对湿度较大、风速较小、风向基本稳定为西南向,1 km附近有逆温层存在,气团扩散条件较差,有利于低空污染物的聚集和持续存在,导致近地面气溶胶

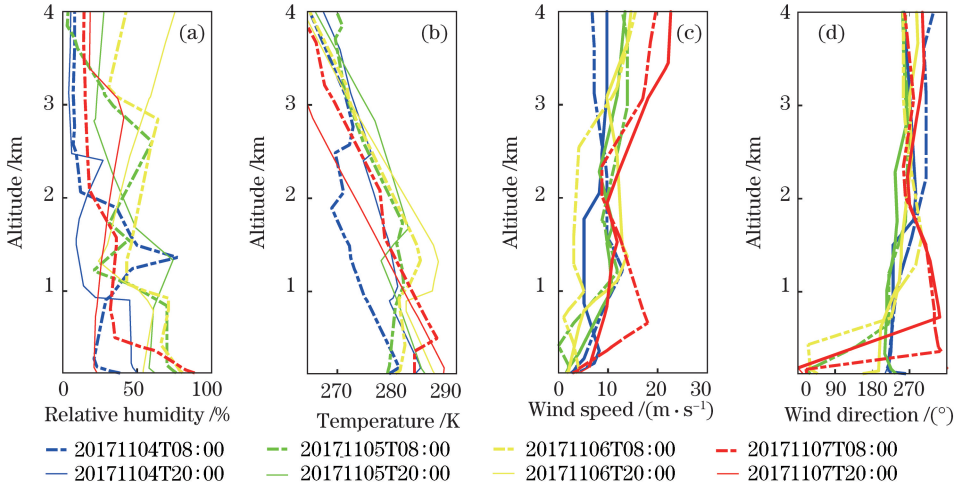


图3 2017-11-04至2017-11-07时段内的探空数据廓线图。(a)相对湿度;(b)温度;(c)风速;(d)风向  
Fig. 3 Profiles of sounding data from November 4 to 7, 2017. (a) Relative humidity; (b) temperature; (c) wind speed; (d) wind direction

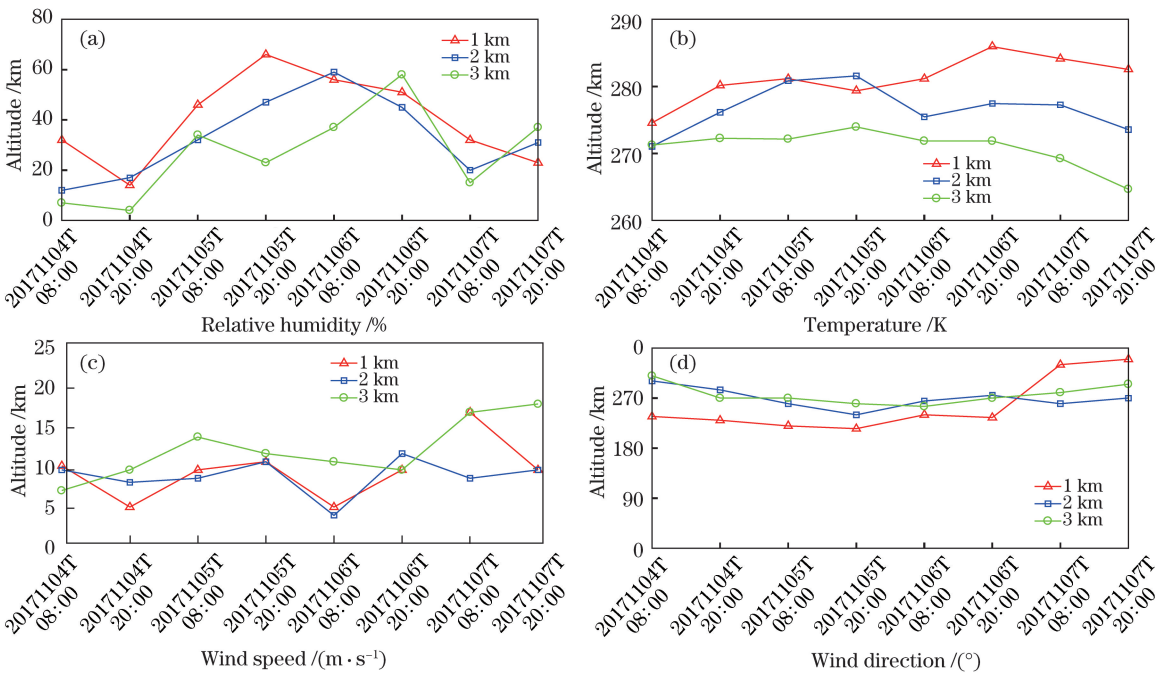


图4 2017-11-04至2017-11-07时段内1,2,3 km高度处探空数据随时间的变化曲线。  
(a)相对湿度;(b)温度;(c)风速;(d)风向

Fig. 4 Temporal variation curves of sounding data at heights of 1, 2, and 3 km from November 4 to 7, 2017. (a) Relative humidity; (b) temperature; (c) wind speed; (d) wind direction

浓度升高,雾霾情况加重。从7日08:00的探空数据廓线可以看出,低空相对湿度高值( $>50\%$ )分布在500 m以下,分布高度明显低于前两日,这与激光雷达观测到雾霾高度持续下降结果一致。另外,风速明显增大,并且风向转为西北,扩散条件转好,有利于雾霾的消散;而到7日20:00风向持续为西北向,且逆温层消失,有利于雾霾向高空逐渐扩散,浓度降低,直至雾霾基本消散,这与激光雷达观测结果一致。

### 3.3 HYSPLIT 轨迹追踪分析

利用 HYSPLIT 轨迹追踪模式对这次雾霾天气中气团运动过程进行后向轨迹模拟(图5),以追踪北京海淀区气团的运动轨迹,分析不同高度上的污染物气团来源。以北京海淀区气象局( $39^{\circ}59'N$ ,  $116^{\circ}17'E$ )为位置参考点,考虑到激光雷达观测结果显示2017年11月4日12:00雾霾影响已经形成,且高度分布在1 km以下,故选取4日12:00之前

24 h气团在120,500,1000 m三个高度层的后向轨迹模拟,如图5(a)所示。另外,激光雷达观测结果显示2017年11月7日晚雾霾逐渐消散,污染层从地面扩散至3 km高度附近,选取雾霾已经消散的时刻8日00:00前24 h气团在1000,2000,3000 m三个高度层的后向轨迹模拟,如图5(b)所示。从图5(a)可以看出,北京海淀区雾霾来源不只是当地污染造成的,120,500,1000 m的污染物主要来自北京南面的河北省。另外,低空120 m气团在传输过程中高度几乎不变化,而从500,1000 m高度气团的后向轨迹可以看出,近地面气团均升高。污染物的传输以及不利的气象条件是造成本次污染的重要因素,也是北京海淀区雾霾形成的主要原因。从图5(b)可以看出,此时气团来自西北向,受西北风的影响,气团逐渐升高,伴随污染物逐渐被吹散,雾霾天气消失,这与激光雷达观测结果体现出良好的一致性。

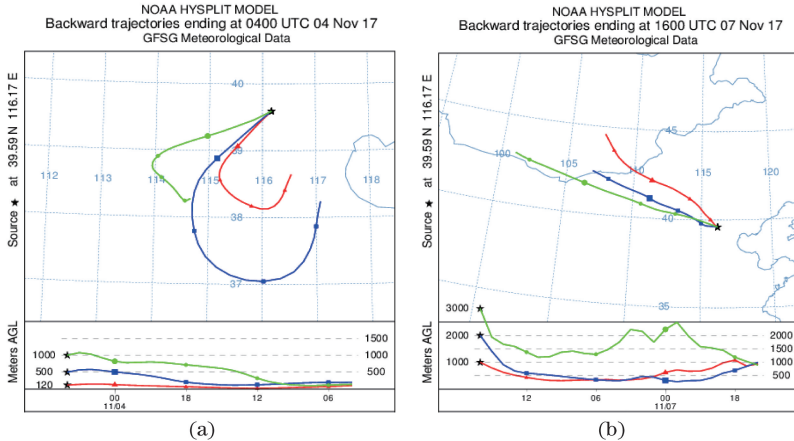


图5 HYSPLIT 轨迹模式模拟的观测地点上空24 h后向追踪轨迹。(a) 20171104T12:00追溯至20171103T12:00; (b) 20171108T00:00追溯至20171107T00:00

Fig. 5 24-h backward tracking trajectories calculated by HYSPLIT model over observation site. (a) From 20171104T12:00 back to 20171103T12:00; (b) from 20171108T00:00 back to 20171107T00:00

## 4 结 论

利用多波长气溶胶激光雷达现场观测数据、气象探空数据及 HYSPLIT 轨迹追踪模型,对2017年11月4日至7日北京海淀区发生的一次雾霾形成和消散过程进行了分析,通过以上3种手段可以实现对雾霾的来源、形成、持续过程及扩散条件等的综合观测分析,得出以下结论:

1) 利用多波长气溶胶激光雷达现场观测数据反演得到的气溶胶消光系数、雾霾高度、退偏振比等参数,分析了此次雾霾的形成、消散过程。多波长气溶胶激光雷达可进行24 h不间断观测实验,能够在雾霾期间对大气进行实时监测,分析其污染过程

特征。

2) 分析雾霾期间探空数据,能为加强雾霾监测提供气象依据。结果显示,相对湿度增大、风速低以及逆温层的存在是雾霾形成和持续存在的重要因素。

3) 根据 HYSPLIT 模式分析,河北一带的污染物输送导致此次北京海淀区的雾霾形成;而此次雾霾消散过程受西北风的影响,伴随近地面污染物向上扩散而消失。

通过以上3种手段的综合分析,获得雾霾形成和消散过程的气溶胶光学参数、气象参数特征及污染气团轨迹追踪,对研究雾霾的形成、消散过程特征具有重要的意义。

**致谢** 本文使用了美国国家大气海洋局(NOAA)空气资料实验室(ARL)提供的后向轨迹模型,在此表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Liu Y H, Feng T, Cai M. Characteristics of the haze phenomenon in Guangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(10): 1081-1087.  
刘永红, 冯婷, 蔡铭. 广州灰霾现象特征分析[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(10): 1081-1087.
- [2] Zhou Y, Zhou N T. The analysis of causes of haze in Beijing based on big data and prediction of PM 2.5 concentration in 2017[J]. *Technology and Innovation Management*, 2017, 38(6): 573-581.  
周勇, 周念彤. 基于大数据的北京雾霾成因分析与2017年PM 2.5浓度预测[J]. *技术与创新管理*, 2017, 38(6): 573-581.
- [3] Sun R, Wang H Y, Ma X J, *et al.* Aerosol optical properties and formation mechanism of a typical air pollution episode in Shanghai during different weather condition periods[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(3): 814-823.  
孙冉, 王鸿宇, 马晓骏, 等. 上海一次典型雾霾过程中不同天气现象的气溶胶光学特性及转化机制[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(3): 814-823.
- [4] Dai J, Cheng Y X. Analysis of one haze in Beijing in July 2016[J]. *Environmental Science Survey*, 2018, 37(1): 34-41.  
戴健, 程月星. 北京市2016年7月一次雾霾天气过程分析[J]. *环境科学导刊*, 2018, 37(1): 34-41.
- [5] Wang K Y, Zhu J J, Zhang Z Q, *et al.* Haze forecast using wind-profiling radar data [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(1): 164-167.  
王开燕, 朱建军, 张振清, 等. 风廓线雷达资料在灰霾预报中的应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(1): 164-167.
- [6] Li F, Wu D, Tan H B, *et al.* The characteristics and causes analysis of a typical haze process during the dry season over Guangzhou area: a case study [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(1): 113-122.  
李菲, 吴兑, 谭浩波, 等. 广州地区旱季一次典型灰霾过程的特征及成因分析[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(1): 113-122.
- [7] Bu L B, Yuan J, Gao A Z, *et al.* Analysis of haze-fog events based on laser ceilometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0901002.  
卜令兵, 袁静, 高爱臻, 等. 基于激光云高仪的雾霾过程探测[J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 0901002.
- [8] Liu M, Yu J Y, Li L, *et al.* Lidar detection analysis during a continuous pollution period in Chongqing urban area [J]. *Laser Journal*, 2014, 35(9): 106-108.  
刘敏, 余家燕, 李礼, 等. 重庆主城区一次持续污染过程的激光雷达探测分析[J]. *激光杂志*, 2014, 35(9): 106-108.
- [9] Draxler R R, Rolph G D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model [J/OL]. National Oceanic and Atmospheric Administration's Air Resources Laboratory, (2018-09-18) [2019-05-06]. [http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php).
- [10] Wang Z J, Du L B, Li X X, *et al.* Observations of marine aerosol by a shipborne multiwavelength lidar over the Yellow Sea of China [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9262: 926218.
- [11] Wang Z J, Du L B, Li X X, *et al.* Development of three-wavelength polarization-Raman lidar and application to shipborne measurements [J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 17003.
- [12] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [13] Li H, Wang Z J, Wang H Y, *et al.* Combined observation of aerosol vertical structure using micro-pulse lidar and compact optical backscatter aerosol detector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 132801.  
李辉, 王章军, 王颢樾, 等. 微脉冲激光雷达与小型后向散射探空仪对气溶胶垂直结构联合观测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 132801.
- [14] Chen C, Wang Z J, Song X Q, *et al.* Development and observational studies of scanning aerosol lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1230009.  
陈超, 王章军, 宋小全, 等. 扫描式气溶胶激光雷达研制与观测研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1230009.
- [15] Wang D X, Song X Q, Feng C Z, *et al.* Coherent Doppler lidar observations of marine atmospheric boundary layer height in the Bohai and Yellow sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s101001.  
王东祥, 宋小全, 冯长中, 等. 相干多普勒激光雷达观测渤海黄海海洋大气边界层高度研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s101001.