

基于激光雷达与铁塔风场数据的浙江北部地区 一次污染过程及其特征研究

吴彬¹, 李艳芳^{1**}, 蒋璐璐^{2*}, 胡景波¹, 周之栩¹, 张喜亮¹

¹湖州市气象局, 浙江 湖州 313000;

²宁波市气象局, 浙江 宁波 315012

摘要 利用大气颗粒物激光雷达观测数据、地面监测站数据和铁塔上搭载的超声波风速仪测量得到的风场数据(简称“铁塔风场数据”),对 2018 年 1 月 16 日至 1 月 18 日浙江北部地区的一次污染过程及特征进行了分析。本次污染过程主要受区域污染物传输影响。激光雷达观测结果表明:受西北风影响,16 日 12 时开始,西北方向城市的污染物开始向宁波传输,颗粒物浓度迅速升高,17 日 18 时之后风向转为较弱南风,污染开始消散;532 nm 通道的距离平方校正信号与近地面污染物浓度的变化趋势一致;退偏振比、波长指数的结果显示,0.5~1 km 高度处的污染物与近地面污染物为两种不同的类型。HYSPLIT 后向轨迹模式结果表明,该污染气团来自宁波的西北方向城市,且气团输送速度较快,HYSPLIT 模式结果与铁塔风场数据分析结果一致。可见激光雷达的探测结果能够有效地表征颗粒物浓度的空间分布以及演变,并为大气污染的监测和预警提供理论依据。

关键词 大气光学;激光雷达;后向散射系数;气溶胶;污染传输

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.130101

Characteristics of Pollution Process in Northern Zhejiang Province Based on Lidar and Tower Wind Field Data

Wu Bin¹, Li Yanfang^{1**}, Jiang Lulu^{2*}, Hu Jingbo¹, Zhou Zhixu¹, Zhang Xiliang¹

¹Huzhou Meteorological Bureau, Huzhou, Zhejiang 313000, China;

²Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo, Zhejiang 315012, China

Abstract Based on lidar observational data of atmospheric particulate matter, ground monitoring station data, and wind field data measured by an ultrasonic anemometer on a tower (later referred to as tower wind field data), a pollution process that occurred from January 16 to 18, 2018 in the northern Zhejiang Province and its characteristics were comprehensively analyzed. The results show that the pollution process is primarily caused by regional pollutant transport. The lidar results show that pollutants in northwest cities begin to be transported to Ningbo via a northwest wind at 12:00 on January 16, causing the concentration of particulate matter to increase rapidly. The wind direction switches to a weaker southern wind at 18:00 on January 17, resulting in the dissipation of the pollutants. The 532 nm range-square-corrected signal is in agreement with the variation trend of the near-ground pollutant concentration; the depolarization ratio and wavelength dependence show that the pollutants at a height of 0.5-1 km and those near the ground are of two different types. The results of the HYSPLIT backward trajectory model show that the polluted air mass comes from the northwest city of Ningbo and is transported at a high speed, consistent with results analyzed from the tower wind field data. Therefore, the lidar observational results can effectively characterize the spatial distribution and evolution of the particulate matter concentration and provide a theoretical basis for air pollution monitoring and early warning systems.

Key words atmospheric optics; lidar; backscattering coefficient; aerosols; pollution transport

OCIS codes 010.1290; 010.3640; 290.1310

收稿日期: 2019-01-04; 修回日期: 2019-01-20; 录用日期: 2019-01-29

基金项目: 湖州市公益性技术应用研究(重点)项目(2018GZ27)

* E-mail: jianglulu87@126.com; ** E-mail: 251279388@qq.com

1 引言

近年来,中国的很多城市都面临着不同程度的环境空气污染问题,尤其在长三角及其周边地区,由于经济发展迅速,人口规模不断扩大,其所面临的大气污染问题也日益严重,环境与经济发展的矛盾日益突出。以南京为代表的长江中下游地区的观测结果表明,颗粒物已经成为影响空气质量的首要污染物^[1]。由于大气污染过程的成因复杂,如何全面、客观、科学地确定颗粒物的光学特性和空间分布特征,是当前环境科学研究中的热门课题。激光雷达是一种非常有效的大气环境遥感手段,其凭借较高的时空分辨率和灵敏度,被广泛应用于气溶胶观测,并作为地面常规观测的重要补充手段^[2]。利用颗粒物激光雷达的观测结果获取大气气溶胶的空间分布信息^[3-5],在气溶胶发生与发展的研究中,发挥了极大的作用,并得到了广泛应用。张天舒等^[6]利用激光雷达对北京奥运期间工业污染源颗粒物输送通量进行了计算。王威等^[7]针对2016年国庆期间一次污染消散过程开展了激光雷达定点与走航观测。通常认为,颗粒物质量浓度是与大气气溶胶消光系数密切相关的参数,在单次散射理论的假设下,二者呈正相关关系^[8]。因此,除了对颗粒物空间分布与光学特性的研究,激光雷达也被广泛应用于颗粒物浓度的定量分析,以及气溶胶的微物理特性研究。何涛等^[9]使用激光雷达与颗粒物监测仪进行对比实验,发现激光雷达反演的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与颗粒物监测仪各个高度上监测结果的相关性均在0.93以上。Lü等^[10-11]利用车载走航激光雷达观测结果,反演了中国北部的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与消光系数廓线。伯广宇等^[12]利用水平探测的双波长激光雷达获取气溶胶消光系数、能见度、Angstrom波长指数以及消光系数吸湿增长因子。项衍等^[13]对激光雷达探测的不确定因素进行了研究;李学彬^[14]等使用线性模型和指数模型,对湿度修正后的消光系数进行颗粒物浓度拟合计算。在环境气象领域,激光雷达也常用于对大气边界层的观测,吕立慧等^[15]利用激光雷达对京津冀边界层高度进行了研究;项衍^[16]等使用图像边缘检测法对激光雷达的探测数据进行了边界层高度计算。

本文针对2018年1月16日至1月18日宁波经历的一次污染过程进行研究,污染期间地面观测数据显示,宁波 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度为

$107.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其中连续6 h $PM_{2.5}$ 质量浓度高于 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$,而宁波2017年 $PM_{2.5}$ 的年平均质量浓度为 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因此,颗粒物为影响空气质量的首要污染物。本文利用激光雷达、地面颗粒物测量仪以及风场测量铁塔,对此次污染过程进行了观测,利用获得的观测数据,对污染过程进行了综合分析。

2 基本原理

2.1 激光雷达原理

本次观测实验地点位于宁波市镇海区气象局(29.976°N , 121.612°E)。双波长三通道激光雷达结构如图1所示,激光雷达系统的主要性能参数见表1。激光雷达使用Nd:YAG激光器,发射激光频率为20 Hz的532 nm(激光能量为25 mJ)与355 nm(激光能量为30 mJ)激光脉冲,脉冲宽度为6~9 ns。出射激光通过扩束器扩束后,经过发射光路准直镜,使光束与望远镜的中心轴线同轴,垂直向上进入大气。在大气传输过程中,激光光束会与大气分子和气溶胶粒子发生相互作用(散射作用和吸收作用),其中一部分返回地面的后向散射回波信号由卡塞格林望远镜接收,经光阑和准直透镜过滤后进入信号采集通道,通过各自的干涉滤光片进行分离,然后用光电倍增管(PMT)进行检测,由信号放大器(AM)进行放大。3个通道的光子信号经过光电转换系统后得到电信号,最终由数据采集系统存储在主控计算机中。

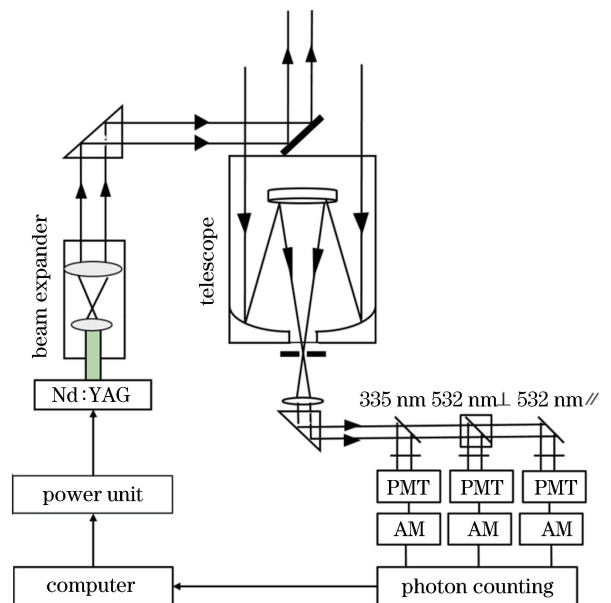


图1 激光雷达系统结构

Fig. 1 Structure of lidar system

表1 激光雷达系统主要参数

Table 1 Key specifications of lidar system

Device	Parameter	Specification
Transmitter	Laser	Nd : YAG
	Wavelength /nm	532, 355
	Pulse energy /mJ	30
	Repetition frequency /Hz	20
	Divergence /mrad	0.2
Receiver	Telescope	Cassegrain
	Diameter /mm	200
	Detector	PMT
	Range resolution /m	7.5

2.2 反演算法

单次 Mie 散射激光雷达方程^[17]可表达为

$$P(r) = ECr^{-2}\beta(r)\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right], \quad (1)$$

式中: $P(r)$ 为激光雷达接收到的高度为 r 处的散射回波信号功率; E 为激光雷达发射能量; C 为雷达常数; $\beta(r)$ 为 r 处的气溶胶后向散射系数; $\sigma(r)$ 为探测高度为 r 处的气溶胶消光系数; $\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right]$ 为大气双程透过率,其中 r' 为 $0\sim r$ 范围内的各探测高度。在求解方程时,若假设后向散射系数与消光系数的比值为定值,可将大气分子消光和大气气溶胶后向散射系数分开考虑。利用 Fernald^[18]法反演计算得

$$\beta_a(r) = -\beta_m(r) + \frac{P(r)r^2\exp\left[2(S_a - S_m)\int_r^{r_m}\beta_m(r')dr'\right]}{\frac{P(r)r^2}{\beta_a(r_m) + \beta_m(r_m)} + 2S_a\int_r^{r_m}P(r)r^2\exp\left[2(S_a - S_m)\int_r^{r_m}\beta_m(r'')dr''\right]dr'}, \quad (2)$$

式中: r_m 为参考边界高度; $\beta_m(r)$ 、 $\beta_a(r)$ 分别为高度 r 处的大气分子和气溶胶后向散射系数; $\sigma_m(r)$ 、 $\sigma_a(r)$ 为高度 r 处的大气分子与气溶胶消光系数; r'' 为 $r\sim r_m$ 范围内的各探测高度。引入消光散射比 $S = \sigma/\beta$,则大气分子和气溶胶消光后向散射比分别为 $S_m = \sigma_m(r)/\beta_m(r) = 8\pi/3$ 、 $S_a = \sigma_a(r)/\beta_a(r)$, S_a 取值一般为 $45\sim 80$ ^[19]。

该雷达的几何因子订正系数如图2所示,可见其影响区域在200 m以下,然而经过几何因子订正

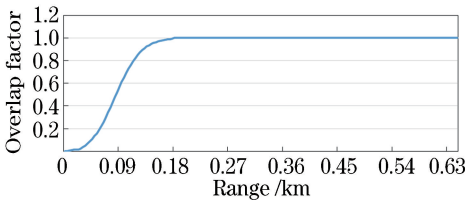


图2 几何重叠因子

Fig. 2 Geometric overlap factor

后反演误差依旧较大,因此文中仅对200 m以上的数据进行反演分析。

2.3 铁塔气象数据

宁波市北仑区凉帽山岛的输电高塔上建设有一套梯度观测系统^[20]。该岛位于 $122.024^\circ E$ 、 $29.911^\circ N$,距离大陆岸约2 km,面积约 1 km^2 。铁塔高达370 m,在国内尚属少见。塔基海拔20 m,在相对于塔基32,60,89,139,179,212,263,298 m高度的南北方向分别安装了气象观测仪,可获得大气温度和湿度的观测数据,此外32,89,212,298 m高度还装有三维超声风温仪,可获得风场信息。高塔观测资料保存前,进行了极值和时间一致性自动检查。在观测期间,温、湿数据质量较差,风场资料中只有32,89,139,263,298 m高度的数据质量较好,故本文选取这5层高度的风场数据进行分析,采样周期为1 s,风速的稳定性为 ± 0.3 ,风向的稳定性为 ± 3 ,其他主要要素观测技术指标见表2。

表2 高塔气象要素观测指标

Table 2 Observation indexes of meteorological elements for instruments on high tower

Element	Observation scope	Resolution	Accuracy	Consistency
Wind speed /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0-60	0.1	± 0.3	± 0.1
Wind direction /($^\circ$)	0-360	3	± 5	± 1
Strong wind speed /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0-90	0.1	± 0.3	
Strong wind direction /($^\circ$)	0-360	3	± 0.3	± 0.1

3 计算与分析

3.1 污染过程分析

2018年1月16日至1月18日期间,浙江北部地区地面受高压脊控制,风速较小,天气条件静稳,中低层存在逆温层,天气形势有利于污染物的堆积。在此天气形势下,宁波发生了一次污染过程,污染过程中宁波市颗粒物浓度变化如图3所示,颗粒物数据来源于国控监测点位的监测数据,使用重量法测量。从16日0时开始,颗粒物浓度不断上升,至17日6时 $PM_{2.5}$ 质量浓度达到最大值 $154 \mu g/m^3$,随后颗粒物浓度持续较高;17日16时后颗粒物浓度开始下降,至18日15时 $PM_{2.5}$ 质量浓度已降至 $75 \mu g/m^3$ 以下。污染期间,南京、常州、苏州、绍兴和宁波的 $PM_{2.5}$ 质量浓度如图4所示,可以看到各城市在此期间均观测到类似的颗粒物质量浓度升高过程, $PM_{2.5}$ 质量浓度的最大值均为 $150 \sim 200 \mu g/m^3$ 。16日上午开始,各城市 $PM_{2.5}$ 质量浓度先后升高,从西北至东南方向上,各城市颗粒物质量浓度开始上升以及到达峰值的时间有明显的时序性,说明这是一次区域污染过程,且污染气团从西北向东南移动。

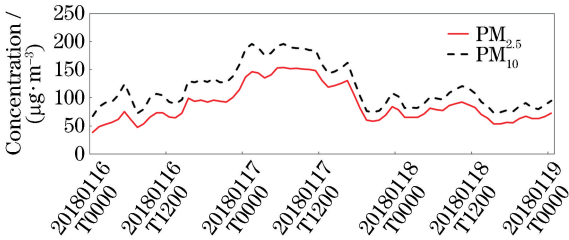


图3 2018年1月16日—18日宁波颗粒物浓度随时间变化
Fig. 3 Variation of particulate matter concentration as time for Ningbo from January 16 to 18, 2018

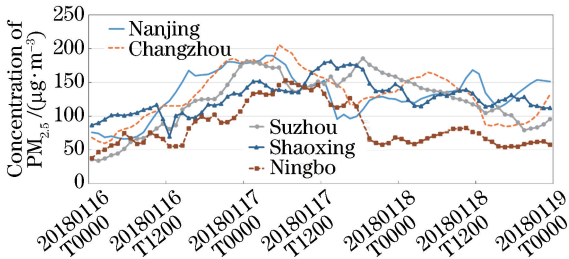


图4 2018年1月16日—18日南京、常州、苏州、绍兴和宁波 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化
Fig. 4 Variation of $PM_{2.5}$ mass concentration as time for Nanjing, Changzhou, Suzhou, Shaoxing, and Ningbo from January 16 to 18, 2018

$A(r) = P(r)r^2$, 利用激光雷达对此次污染过程进行观测,给出532 nm通道的距离平方校正信号如图5所示。16日12时之前距离平方信号强度较弱,12时开始300 m以下距离平方信号强度逐渐升高,由于污染不断发展,距离平方信号持续较强,由图5可见,该时段污染物主要集中在0.5 km以下。17日夜间开始监测到0.5 km处有低云产生的强回波带,同时颗粒物浓度降低,500 m以下回波信号强度减小。18日12时开始强回波带逐渐下降,21时前后降至近地面。这主要是受弱降雨影响,激光雷达无法穿透雨区,产生了紧贴地面的强回波带,同时由于降水的清洁作用,颗粒物浓度降低。

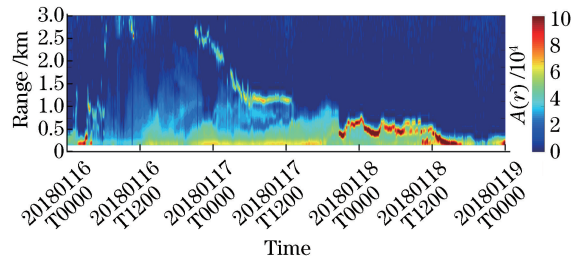


图5 2018年1月16日—18日激光雷达532 nm距离平方校正信号
Fig. 5 532-nm range-square-corrected signal of lidar from January 16 to 18, 2018

通过532 nm的2个偏振通道的探测结果,可以得到污染过程中退偏振比的时空分布,如图6所示,退偏振比与粒子的尺度与形状有关,一般灰霾气溶胶的退偏振比小于0.2^[13]。污染过程中,近地面污染物的退偏振比较低,对应的距离平方信号强度较高,近地面的污染物可能以浓度较高的细粒子与球形粒子为主;从近地面(0.2~0.5 km)与0.5~1 km退偏振比的平均值随时间的变化曲线(图6白箭头所示)可知,16日13时至17日9时,0.5~1 km污染物的退偏振比基本高于近地面,其对应的距离平方信号低于近地面污染物,可能以粗粒子与非

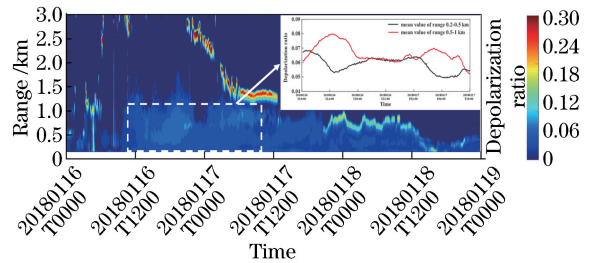


图6 2018年1月16日—18日退偏振比
Fig. 6 Depolarization ratio of pollutants from January 16 to 18, 2018

激光雷达的距离平方校正信号可表示为

球形粒子为主。利用激光雷达测得 532 nm 与 355 nm 的 2 个通道的后向散射系数,给出 Angstrom 波长指数如图 7 所示;近地面(0.2~0.5 km)和 0.5~1 km 波长指数的平均值随时间变化曲线(图 7 黑箭头所示)显示,16 日 13 时至 17 日 9 时,0.5~1 km 污染物的波长指数高于近地面,0.5~1 km 污染物与近地面污染物为两种不同类型。

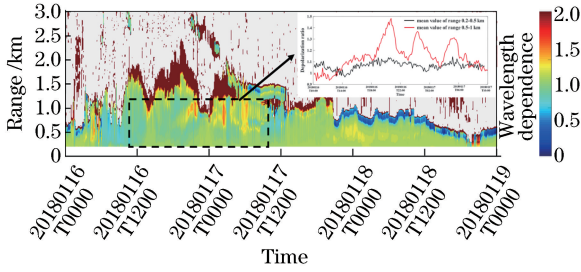


图 7 2018 年 1 月 16 日—18 日波长指数

Fig. 7 Wavelength dependence of pollutants from January 16 to 18, 2018

为进一步研究污染过程中气溶胶的空间分布特征,图 8 给出了污染过程中不同阶段的后向散射系

数、退偏振比与波长指数廓线,1 km 以上的波长指数受噪声影响,数据有效性较差,因此仅使用 1 km 以下的波长指数廓线进行数据分析。污染前期 16 日 10 时的后向散射系数廓线显示,气溶胶主要分布在 0.5 km 以下,后向散射系数低于 0.012 km^{-1} 。随着污染物不断发展,至 16 日 20 时,0.2 km 处气溶胶后向散射系数已超过 0.015 km^{-1} ,且在 1 km 处有一高值,1~1.5 km 有一定的污染物存在。17 日 20 时的后向散射系数廓线显示,此时污染已逐渐消散,与 16 日 10 时的后向散射系数廓线相近,说明污染物浓度已经降至污染之前的水平。由图 8(b) 的退偏振比廓线可知,在污染过程的前、中、后阶段均有退偏振比较高的区域,且高值区域的高度随着时间降低,空中可能有非球形气溶胶过境,且气溶胶高度随时间降低的过程,在污染较重的 16 日 20 时,退偏振比最大,说明重污染时段受到该气溶胶的影响最大。通过图 8(c) 的波长指数廓线也可发现,在该时段,0.5~1 km 处的波长指数明显高于近地面,表明该污染过程同时受 2 种不同污染物的影响。

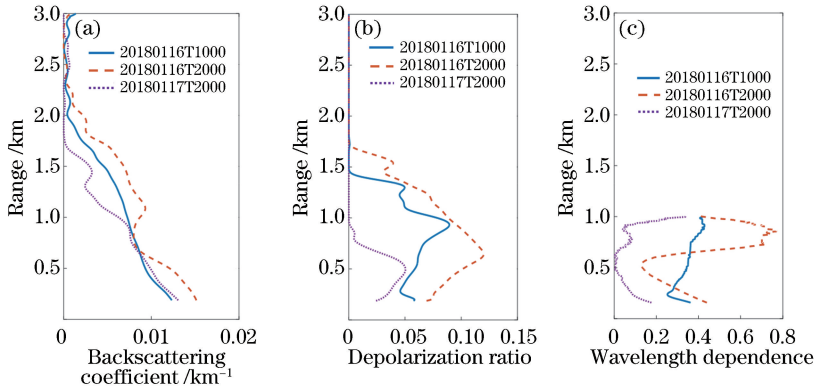


图 8 污染不同时段气溶胶光学特性对比。(a)后向散射系数;(b)退偏振比;(c)波长指数

Fig. 8 Comparison of optical properties of aerosols at different time of pollution process. (a) Backscattering coefficient; (b) depolarization ratio; (c) wavelength dependence

3.2 铁塔气象数据分析

通过铁塔上的超声波测速仪可知污染期间不同高度上的风场情况。32,89,139,263,298 m 高度的风场矢量图见图 9。从图中可见,在污染过程前期,16 日 12 时之前各高度主要以较弱的偏南风为主,大气水平扩散条件较差,同时南风带来暖湿气流,局地颗粒物浓度持续累积。16 日 12 时以后各高度风向均转为偏北风,同时风速增大。16 日 12 时至 17 日 18 时期间,各高度水平风速较大,大气水平扩散条件转好,颗粒物浓度于 16 日 12 时开始迅速增长,且在该时段内颗粒物浓度均维持在较高值,说明此次污染主要受区域污染传输影响,局地污染物的累

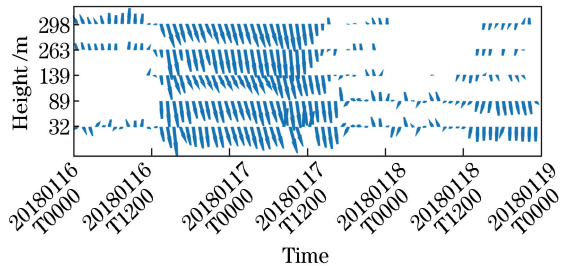


图 9 铁塔不同高度处的风场矢量图

Fig. 9 Vector diagram of wind field at different heights of tower

积对此次污染过程的贡献较小。17 日 18 时之后各高度的风场均转为较弱的偏南风,北方的污染物停

止向南传输,随着宁波的污染物逐渐扩散,颗粒物浓度开始逐渐降低。

根据铁塔数据,绘制污染时段内各个高度上的风玫瑰图如图 10 所示,在铁塔的各个高度上风向均以偏北风为主。32 m 处的风向主要以北风与西北风为主,其中北风约占所有风向的 20%,但风速 W_s

较小,一般低于 6 m/s。32 m 处西北风约占 40%,且西北风风速大于北风,风速主要分布在 4~12 m/s,在该高度处的区域污染传输中,西北风的贡献大于北风。在其余 4 个高度,风向均以西北风为主,西北风占比均在 60%以上,且风速大于其他风向,主要分布在 4~12 m/s。

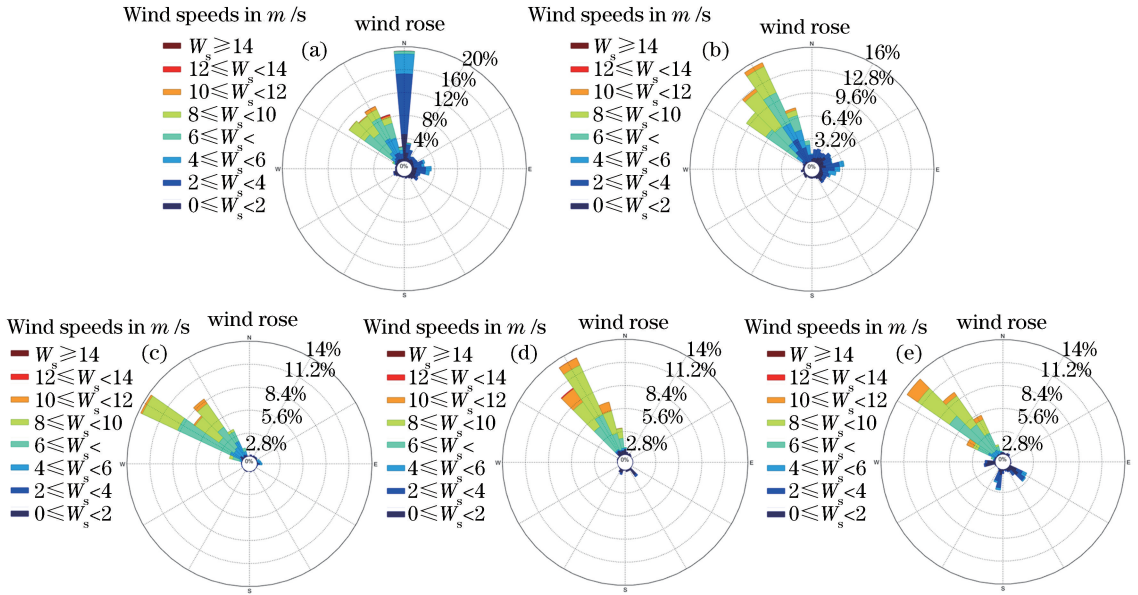


图 10 不同高度上的风玫瑰图。(a) 32 m;(b) 89 m;(c) 139 m;(d) 263 m;(e) 298 m

Fig. 10 Wind-rose diagrams at different heights of tower. (a) 32 m; (b) 89 m; (c) 139 m; (d) 263 m; (e) 298 m

利用铁塔各高度的风场数据,结合激光雷达观测结果以及地面监测站的颗粒物浓度数据,进行综合分析可知,此次污染过程主要受区域污染物传输影响,16日12时风向开始转变,受西北风影响,西北方向城市的污染物开始向宁波传输,宁波颗粒物浓度迅速升高,16日12时至17日18时期间有较强西北风,区域污染物输送一直持续。17日18时后风向转为较弱南风,污染开始消散,污染过程趋于结束。结合 HYSPLIT 后向轨迹模式对此次过程进行分析,由于该过程是边界层内的区域污染输送,因此选取 300,500,700 m 共 3 个高度对宁波 17 日 0 时的污染气团进行 24 h 后向轨迹分析(图略),结果表明,该污染气团来自宁波的西北方向城市,且气团输送速度较快,HYSPLIT 模式结果与铁塔风场数据分析结果一致,且与图 4 中各城市的颗粒物浓度变化趋势一致。

4 结 论

针对 2018 年 1 月 16 日至 18 日浙江北部地区一次污染过程,基于大气颗粒物激光雷达探测数据与地面监测站数据,并结合宁波的铁塔风场数据对

其进行综合分析。此次污染过程主要受区域污染物传输影响,激光雷达观测结果表明,颗粒物浓度在 16 日 12 时开始增加,在 0.5 km 以下颗粒物浓度较高,且污染物在 1.5 km 以下均有分布,17 日 18 时开始污染消散;532 nm 通道的距离平方校正信号与近地面污染物浓度的变化趋势一致;同时激光雷达监测到污染过程中,宁波 0.5~1 km 高度与近地面同时受到 2 种不同污染物的影响。铁塔风场数据的分析结果显示,此次污染过程受区域污染传输影响,污染期间有较强西北风,宁波的颗粒物污染主要来自西北方向城市的传输;HYSPLIT 后向轨迹模式的反演结果也表明,污染期间的污染气团来自西北方向,与观测结论一致。

参 考 文 献

[1] Zhou Y Y, Ma Y, Zheng J, *et al.* Pollution characteristics and light extinction effects of water-soluble ions in PM_{2.5} during winter hazy days at North Suburban Nanjing[J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 1926-1934.
周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 等. 南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究[J]. 环境科

- 学, 2015, 36(6): 1926-1934.
- [2] Wang S L, Xie P H, Hu S X, *et al.* Measurement of atmospheric boundary layer pollutants by mobile lidar in Beijing[J]. Environmental Science, 2008, 29(3): 562-568.
汪少林, 谢品华, 胡顺星, 等. 车载激光雷达对北京地区边界层污染监测研究[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 562-568.
- [3] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [4] Cao N W, Shi J Z, Zhang Y Y, *et al.* Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060101.
曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060101.
- [5] Yang S P, Cao N W, Song X Y, *et al.* Effects of atmospheric aerosol on ozone observation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070102.
杨思鹏, 曹念文, 宋秀瑜, 等. 大气气溶胶对臭氧观测影响的讨论[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070102.
- [6] Zhang T S, Liu W Q, Zhao X S, *et al.* Particles transport flux monitoring of industrial sources during Beijing Olympic Games by lidar [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(5): 362-367.
张天舒, 刘文清, 赵雪松, 等. 北京奥运期间工业污染源颗粒物输送通量的激光雷达监测[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(5): 362-367.
- [7] Wang W, Yang N, Shi Y L, *et al.* Application of mobile lidar in analyzing regional pollutants transportation during a haze episode over Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(1): 7-13.
王威, 杨楠, 师耀龙, 等. 京津冀一次空气重污染过程激光雷达走航观测分析[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 7-13.
- [8] van de Hulst H C. Light scattering by small particles [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1957: 127-129.
- [9] He T, Hou L J, Lü B, *et al.* Study of accuracy of lidar inversion $PM_{2.5}$ concentration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0113001.
何涛, 侯鲁健, 吕波, 等. 激光雷达探测反演 $PM_{2.5}$ 浓度的精度研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0113001.
- [10] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Observations of particle extinction, $PM_{2.5}$ mass concentration profile and flux in North China based on mobile lidar technique [J]. Atmospheric Environment, 2017, 164: 360-369.
- [11] Lü L H, Liu W Q, Fan G Q, *et al.* Application of mobile vehicle lidar for urban air pollution monitoring [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(6): 060101.
- [12] Bo G Y, Liu D, Wu D C, *et al.* Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days [J]. Chinese Journal of 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.
- [13] Xiang Y, Liu J G, Zhang T S, *et al.* Uncertainty factors of aerosol optical properties inversion by lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 092801.
项衍, 刘建国, 张天舒, 等. 激光雷达探测气溶胶光学特性的不确定性因素研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092801.
- [14] Li X B, Xu Q S, Wei H L, *et al.* Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 29(9): 1655-1658.
李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. 光学学报, 2008, 29(9): 1655-1658.
- [15] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Characteristics of boundary layer height in Jing-Jin-Ji area based on lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010101.
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010101.
- [16] Xiang Y, Ye Q H, Liu J G, *et al.* Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0704003.
项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0704003.
- [17] Wang Z E, Nakane H, Hu H L, *et al.* Three-wavelength dual differential absorption lidar method for stratospheric ozone measurements in the presence of volcanic aerosols [J]. Applied Optics, 1997, 36(6): 1245-1252.

- [18] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [19] Noh Y M, Kim Y J, Choi B C, *et al.* Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea [J]. Atmospheric Research, 2007, 86(1): 76-87.
- [20] Tu X P, Yao R S, Yang H, *et al.* Observation and analysis of boundary layer meteorological elements of an extratropical cyclone blowing into the sea [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 160-170.
涂小萍, 姚日升, 杨豪, 等. 一次入海温带气旋边界层气象要素观测分析 [J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 160-170.