

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.03.002

基于激光雷达观测网的杭州及周边地区颗粒物污染特征研究

徐 达¹, 张 全¹, 范广强^{2*}, 姚德飞¹, 田旭东¹, 王 界³, 李文刚³

(1 浙江省环境监测中心, 浙江 杭州 310012;

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

3 无锡中科光电技术有限公司, 江苏 无锡 214135)

摘 要: 激光雷达观测网是研究区域大气颗粒物污染分布特征的有力工具。长三角地区激光雷达观测网部分站点的激光雷达资料与地面气象数据、PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度数据, 以及 HYSPLIT 后向轨迹模型模拟的后向轨迹相结合, 对 2016 年 9 月杭州及其周边地区一次颗粒物污染的来源和成因进行了分析。分析结果表明, 9 月 8 日杭州颗粒物污染过程是该地区局地污染与高空输送共同作用的结果, 且粗粒子主要来源于西北方向。杭州地区 SO₂ 浓度整体较低, PM_{2.5} 浓度与 NO₂ 浓度呈正相关, 细颗粒物主要以硝酸盐为主。较高的 NO₂ 浓度和高湿度、低风速的不利气象条件, 是该地区局地细粒子快速增长的主要原因。

关键词: 大气颗粒物; 激光雷达; HYSPLIT 后向轨迹模型; 颗粒物污染

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1673-6141(2019)03-0171-08

Characteristics of Particles Pollution Based on Lidar Network in Hangzhou and Surrounding Areas

XU Da¹, ZHANG Quan¹, FAN Guangqiang^{2*}, YAO Defei¹, TIAN Xudong¹,
WANG Jie³, LI Wengang³

(1 Zhejiang Province Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310012, China;

2 Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3 Wuxi CAS Photonics Co.Ltd, Wuxi 214135, China)

Abstract: Lidar observation network plays an important role in the research of regional distribution characteristics of particulates. The data of the lidar network in the Yangtze River Delta region were examined

基金项目: Supported by National Program of China(国家重点研发计划, 2017YFC0209600)and National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41605020)

作者简介: 徐 达 (1985 -), 男, 浙江嵊州人, 工程师, 从事环境科学方面的研究。E-mail: 86083063@163.com.

收稿日期: 2018-01-22; **修改日期:** 2018-04-10

* **通信联系人.** E-mail: gqfan@aiofm.ac.cn

together with meteorological data, PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations and the HYSPLIT backward trajectory model, to analyze the sources and causes of particle pollution in Hangzhou and surrounding areas. The analysis showed that, the particles pollution process in September 2016 in Hangzhou was the consequence of combination of the local pollution and external transportation dust, and the coarse particles were mainly from the northwest China in the pollution process. The concentration of SO₂ remained at low level, and that of PM_{2.5} was positively associated with the concentration of NO₂, and the nitrate second particles were prevalent in fine particles. The higher concentration of NO₂, high humidity, and low wind speed were all the main causes of the rapid growth of fine particles in the region.

Key words: atmospheric particles; lidar; HYSPLIT backward trajectory model; particle pollution

1 引言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的液态或固态粒子, 不仅对人体健康、环境等具有重要影响, 还能通过吸收和散射太阳辐射影响地气系统的能量交换, 进而对气候系统产生影响^[1]。因此对大气气溶胶的探测研究是当前环境科学领域的研究热点之一。激光雷达作为大气气溶胶遥感探测的有力工具, 具有高时空分辨率、高探测精度和可以连续探测等优点, 被广泛用于大气科学和环境科学等领域^[2-3]。由于气溶胶的分布具有显著的区域性, 独立站点的激光雷达数据很难反映气溶胶的区域特征, 激光雷达观测网的建立就变得尤其重要。到目前为止, 国内外已建立了多个激光雷达观测网, 为云、气溶胶光学特性和全球气候效应的研究提供了有力的依据^[4-6]。近年来, 我国区域大气污染事件频发, 覆盖京津冀, 长三角、珠三角地区的区域性激光雷达观测网也逐步建立起来, 实现了对区域大气灰霾污染的连续监测, 为我国区域大气污染特征的研究提供了宝贵的资料, 在我国大气颗粒物污染特征探测研究中发挥着不可或缺的作用^[7-8]。

杭州作为长三角城市群的重要组成部分, 近年来随着经济的快速发展和城市化进程的加快, 其空气质量问题也引起广泛的关注。本文利用长三角地区激光雷达观测网部分站点的激光雷达资料, 采用 Fernald 算法, 对杭州及其周边地区 2016 年 9 月区域颗粒物污染特征进行了分析研究。

2 资料与方法

2.1 资料来源

实验采用美国 SigmaSpace 公司生产的微脉冲激光雷达, 激光雷达系统主要由激光发射、光学接收和信号采集三部分组成。激光发射单元的激光器中心波长为 532 nm, 单脉冲能量为 6~10 μJ , 脉冲重复频率为 2500 Hz, 脉冲宽度为 20 ns。发射光束经准直、扩束后垂直进入大气, 由于几何重叠因子存在, 系统在近场存在探测盲区, 盲区大小为 150 m。实验采用的微脉冲激光雷达的空间分辨率为 15 m。该微脉冲激光雷达系统已被 NASA 用于建立全球气溶胶监测网 (Micro-Pulse Lidar Network, MPLNET), 用于全世界范围内云和气溶胶的全天候的连续观测^[4]。

另外采用美国 MetOne 公司生产的 BAM-1020 在线颗粒物监测仪进行 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的自动连续监测, 其原理是利用 β 射线衰减测量大气颗粒浓度, 测量分辨率为 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 测量精度为 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 气象参数资料由浙江省环境监测中心大气多参数站提供; 气团后向轨迹分析则利用美国海洋与大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 空气资源实验室 (Air Resources Laboratory, ARL) 与澳大利亚气象局联合开发的 HYSPLIT (Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model) 后向轨

迹模型和全球数据同化系统 (Global Data Assimilation System, GDAS) 数据库, 气团轨迹模拟初始高度为 500 m, 轨迹后向反演时间为 72 h。

针对杭州及周边地区的颗粒物污染特征, 以激光雷达为主要研究手段, 利用长三角地区激光雷达观测网中的多套地基激光雷达系统 (包括杭州渔山站、临安区昌化站、绍兴滨海新城站、嘉兴善西站和杭州千岛湖站) 在 2016 年 9 月的观测资料, 并结合杭州渔山站的地面常规监测数据和气团后向轨迹, 重点分析了该区域 9 月颗粒物污染的时空分布变化特征及颗粒物污染成因。杭州及其周边地区激光雷达站点分布如图 1 所示。

2.2 分析方法

Fernald 算法是目前常用的激光雷达数据反演算法之一, 常用于大气非均匀分布情况下大气气溶胶消光系数廓线的反演。Fernald 算法假设气溶胶消光后向散射比 $S_a = \alpha_a(r)/\beta_a(r)$ 和大气分子消光后向散射比 $S_m = \alpha_m(r)/\beta_m(r)$ 为两个常数, 并在已知一参考高度 r_c 处的气溶胶消光系数和空气分子的消光系数的情况下, 给出了参考高度 r_c 处以下大气气溶胶的消光系数公式^[9]

$$\alpha_a(r) = -\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r')dr'\right]}{\frac{P(r_c)r^2}{\alpha_a(r_c) + \frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r_c)} + 2 \int_r^{r_c} P(r')r'^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r'')dr''\right]dr'}, \quad (1)$$

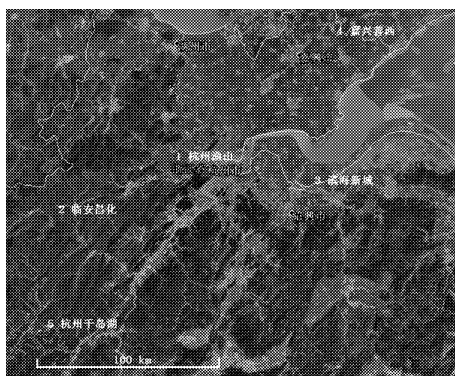


图 1 杭州市及周边地区激光雷达站点分布图

Fig.1 Distribution map of lidar sites in Hangzhou and surrounding areas

式中 $\alpha_a(r)$ 和 $\alpha_m(r)$ 分别为在距离 r 处的气溶胶和空气分子的消光系数; 同样的 $\alpha_a(r)$ 和 $\alpha_m(r)$ 分别为在距离 r 处的气溶胶和空气分子的后向散射系数。

3 结果和讨论

3.1 近地面颗粒物浓度及气象要素分析

图 2 所示为 2016 年 9 月 4~9 日杭州渔山站点近地面 PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度随时间的变化曲线。从图 2 中可以看出, 9 月 4~7 日期间, PM_{2.5} 质量浓度整体较低, 最大值为 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 整体在 PM_{2.5} 质量浓度限值 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。9 月 8 日, 该站点 PM_{2.5} 质量浓度变化剧烈, 从 0 时的 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 迅速上升, 并在 9 月 8 日 20:00 达到峰值 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。此时近地面 PM₁₀ 质量浓度也同时达到峰值 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。9 月 8 日 20:00 后, PM_{2.5} 浓度有所下降, 但在 9 月 9 日上午 10:00, PM₁₀ 浓度却达到了这段时间的最高值

150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 并且此后维持在 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。从细颗粒物 PM2.5 在 PM10 中的比重的变化曲线来看, 除颗粒物浓度整体处于较低水平时段外, 大部分时刻细颗粒物 PM2.5 在 PM10 中的比重值高于 0.5, 最高值为 0.99, 该地区该时段颗粒物主要以细粒子为主。另外, PM2.5 占 PM10 比重值与 PM2.5、PM10 质量浓度变化趋势对比来看, 9 月 7 日之后, PM2.5、PM10 质量浓度从最低值逐步增长至最大值并维持在高值区, 而 PM2.5 在 PM10 中的比重值则在该时间段从最高值逐渐降低并稳定在 0.5 左右, 粗粒子占比有所增加。

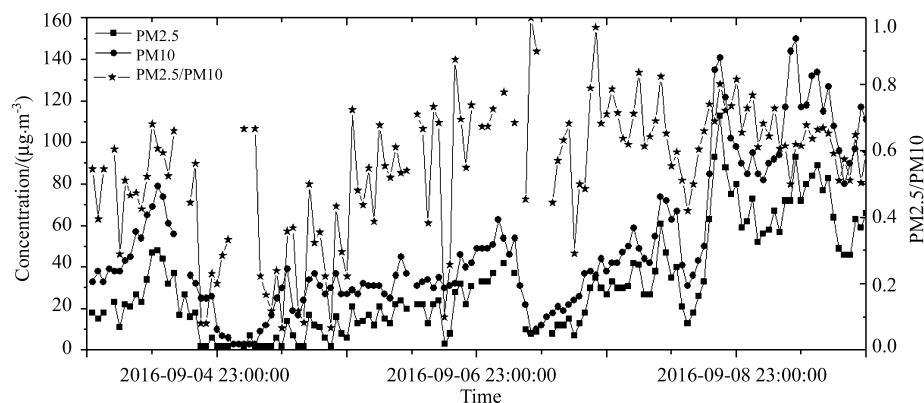


图 2 杭州 2016 年 9 月 4~9 日 PM2.5、PM10 浓度变化

Fig.2 Time series of PM2.5 and PM10 from September 4 to September 9 in 2016 in Hangzhou

图 3 给出了 9 月 4~9 日近地面风速、风向的变化情况。如图 3 所示, 该时间段内杭州地区近地面无明显风向, 且风速较小, 基本在 3 m/s 以下, 天气形势稳定。在此天气形势下, 不利于污染物扩散易造成污染物的累积。尤其是在有局地污染源的情况下, 易形成颗粒物污染。

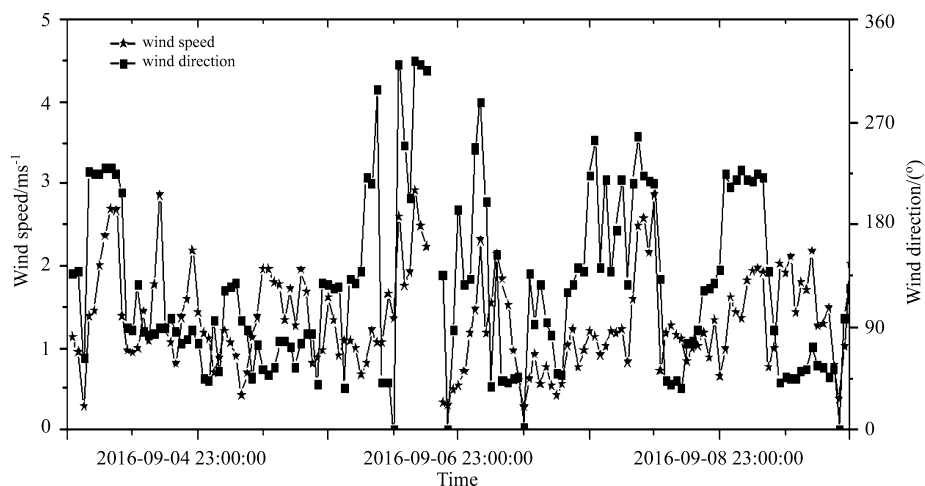


图 3 杭州 2016 年 9 月 4~9 日近地面风速、风向数据

Fig.3 Time series of wind speed and wind direction from September 4 to September 9 in 2016 in Hangzhou

3.2 杭州及周边地区颗粒物的区域分布特征

图 4 所示为杭州渔山站点 2016 年 9 月 4~9 日激光雷达探测得到的消光系数和退偏振度时空分布图。从图 4(a) 中消光系数的时空分布图中可以看出, 在 9 月 7 日之前, 除个别时段外, 杭州渔山站点的气溶胶消光系数整体偏低, 颗粒物浓度偏低; 但在 9 月 7 日夜間, 近地面消光系数出现明显增长, 这与近地面

监测站点测得的颗粒物质量浓度的变化相一致。除在近地面 0.8 km 范围内出现消光系数的高值区域外, 消光系数在 1~3 km 高度处也有明显的增加, 并在 9 月 8 日下午高空 1~3 km 处的颗粒物消光系数逐渐降低, 同时近地面气溶胶消光系数持续增大。该时段消光系数的时空变化属于有沙尘输送天气时消光系数的变化特征。从图 4(b) 中所示的激光雷达测得的退偏比的时空连续变化图可以看出, 在近地面消光系数高值区域, 退偏振度值较低, 说明近地面颗粒物主要为细粒子, 这一结果与 3.1 节中近地面颗粒物质量浓度部分的分析结果相一致; 在 9 月 7 日夜间高空出现了退偏振度的高值, 退偏振度在 0.2 以上。综合消光系数和退偏比图可以看出该地区存在外来粗粒子输送。在退偏比高值区所在高度逐渐下降的同时, 高空和近地面消光系数均有所增加, 说明在粗粒子沉降的同时, 可能由气粒转换导致了球形粒子的大量增加。因此杭州地区本次污染过程是受外源粗粒子输入和本地污染共同作用的结果。

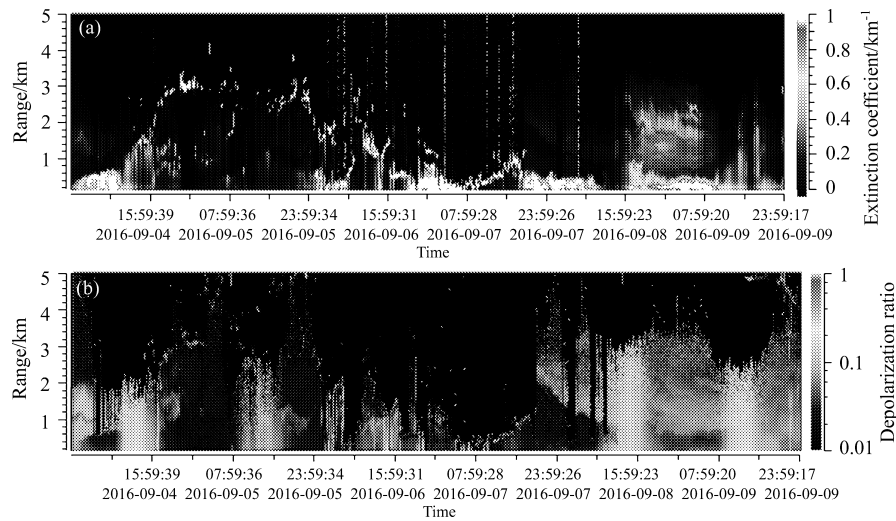
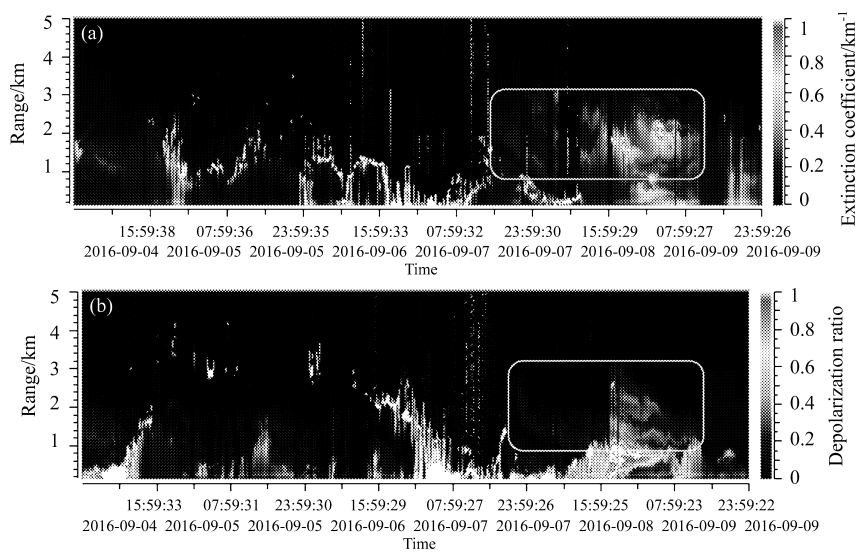


图 4 16 年 9 月 4~9 日杭州渔山站激光雷达 (a) 消光系数及 (b) 退偏比时空分布图

Fig.4 Space-time distribution of (a) particle extinction coefficient and (b) depolarization ratio from September 4 to September 9 in 2016 in the site of Yushan



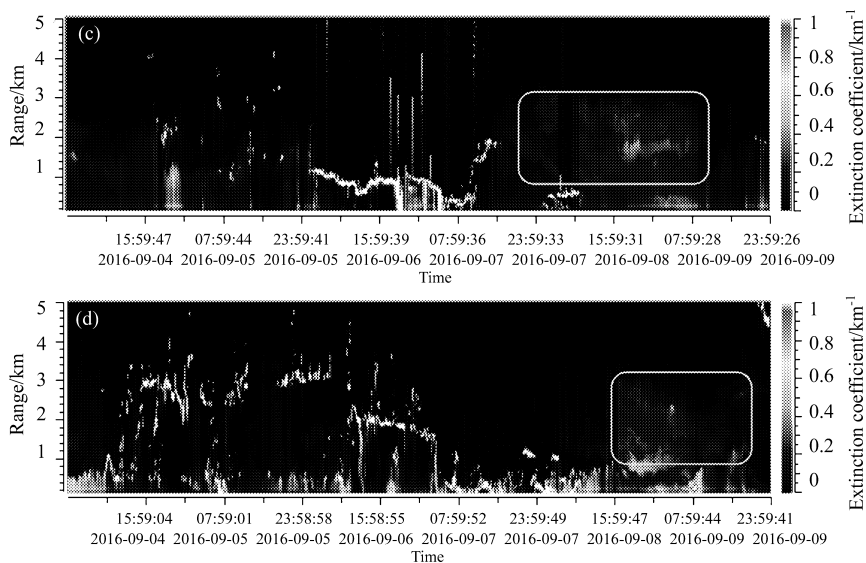


图 5 16 年 9 月 4~9 日杭州周边 4 个激光雷达站点的消光系数时空分布图。(a) 临安昌化站; (b) 嘉兴善西站; (c) 杭州千岛湖站; (d) 绍兴滨海新城站

Fig.5 Space-time distribution of particle extinction coefficient from September 4 to September 9 in 2016
(a) Linan Changhua station; (b) Jiaxing Shanxi station;
(c) Hangzhou Thousand Island Lake station; (d) Shaoxing Binghai New Aera station

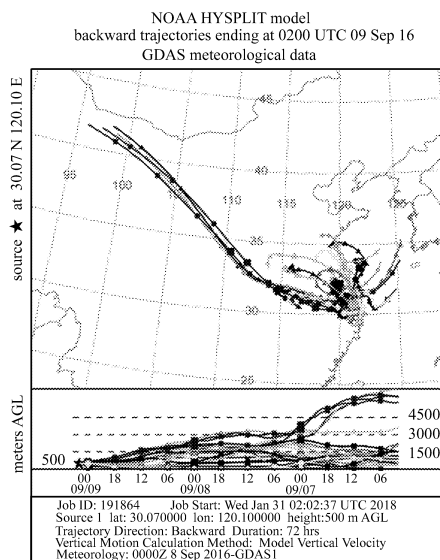


图 6 2016 年 9 月 9 日 500 m 处杭州地区气团后向轨迹 HYSPLIT 模型分析

Fig.6 Backward trajectories at 500 m height determined by the HYSPLIT model on September 9 in 2016 in Hangzhou

图 5 为长三角激光雷达观测网在杭州周边地区 4 个激光雷达站点同时期测量到的消光系数时空分布结果。可以看出，颗粒物的时空分布和变化特征和杭州渔山站点整体相似但存在一定的差异，说明该地区的颗粒物污染具有区域分布特征。其中，从 5 个站点的消光系数的时空分布结果来看，激光雷达在高空都观测到了颗粒物污染层，不同的是观测到高空颗粒物出现的时间、颗粒物浓度和所在高度有所差异。从时间上看，位于杭州西部的临安昌化站 [图 5(a)]9 月 7 日 16:00 左右最早观测到上空的颗粒物污染层 (如图中

白框中所示);杭州渔山站、嘉兴善西站[图5(b)]和杭州千岛湖站[图5(c)]等站点在9月7日20:00观测到上空的颗粒物污染层(如图中白框中所示);而位于杭州东部的绍兴滨海新城站[图5(d)]9月8日16:00左右才观测到该颗粒物污染层。从空间分布上看,上空颗粒物浓度和所在高度变化趋势则由西北向东南方向逐渐降低。因此认为外源输入的颗粒物输送路径为从杭州西北向东南方向。

3.3 颗粒物来源分析

从激光雷达的观测结果来看,杭州地区此次颗粒物污染过程是外源远距离输送的粗粒子和局地细粒子污染的叠加,且外来远距离输送的粗粒子来源于西北方向。为进一步分析颗粒物的来源和输送路径,利用HYSPLIT后向轨迹模型(来源于NOAA实验室的HYSPLIT后向轨迹模型:http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php)对杭州地区的气团轨迹进行了分析,起始时间为北京时间9月9日10:00。500 m高度72 h的后向轨迹分析如图6所示。结合杭州及周边几个站点的激光雷达观测结果,可以认为:本次污染过程外源输入的粗粒子来源于西北方向,高空的粗粒子随西北气流进入杭州并与本地细粒子污染叠加。

图7为9月4~9日环境监测站观测到的近地面PM_{2.5}、气态污染物浓度及相对湿度(relative humidity, RH)资料。可以看出,该地区SO₂浓度一直处于较低水平,浓度低于10 μg/m³;9月7日前NO₂浓度也一直处于较低水平,浓度低于20 μg/m³,但在9月7日之后,NO₂浓度逐渐升高,并在9月9日05:00达到最高值84 μg/m³。从图7中还可以看出,当NO₂浓度增加时,细颗粒物PM_{2.5}质量浓度也随之上升,这一结果与王晓利等在京津冀地区城市气态污染物与细颗粒物相关性研究中得出的结果一致^[10]。细颗粒物PM_{2.5}质量浓度与NO₂浓度呈高度正相关,因此杭州地区该时期的细颗粒物主要以硝酸盐为主。此外,该时段杭州地区整体湿度较大,相对湿度基本在60%以上,最高值达到了99%。另外,图7中的湿度和NO₂浓度变化曲线还显示,NO₂浓度水平对湿度敏感,在相对湿度达到90%时,NO₂浓度就会迅速减小。因此较高的NO₂浓度和高湿度、低风速的不利气象条件,是该地区局地细粒子快速增长的主要原因。

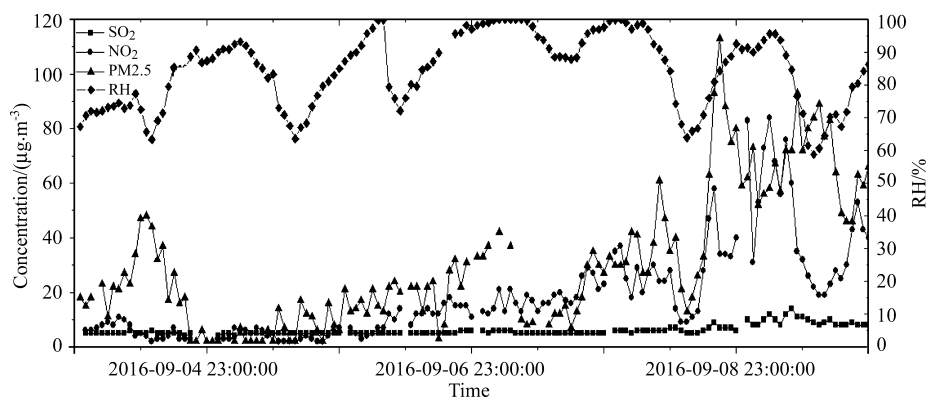


图7 杭州2016年9月4~9日近地面PM_{2.5}、气态污染物浓度及相对湿度资料

Fig.7 Time series of PM_{2.5}, gas pollutants and RH from September 4 to 9 in 2016 in Hangzhou

4 结论

利用长三角地区激光雷达观测网的部分站点的激光雷达资料,并结合地面监测数据、气象数据和基于HYSPLIT的后向轨迹模拟资料,对2016年9月杭州及其周边地区一次颗粒物污染过程进行了分析。分析结果表明,杭州地区此次污染过程是在天气形势稳定的气象条件下,局地累积的细粒子和外源远距离输送的粗粒子共同作用的结果。其中杭州及其周边4个激光雷达站点的观测结果和基于HYSPLIT后向轨迹模

型的后向轨迹结果均表明高空输送的粗粒子来源于西北方向;而基于地面监测数据和气象资料的分析则表明该地区局地细粒子污染主要与较高的 NO_2 浓度和高湿度、低风速的不利气象条件等因素有关。

参考文献 :

- [1] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 826-840(in Chinese).
石广玉, 王 标, 张 华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 826-840.
- [2] Menut L, Flamant C, Pelon J, *et al.* Urban boundary-layer height determination from lidar measurements over the paris area [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(6): 945-954.
- [3] Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.* Application study of lidar in Urban traffic pollution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 315-320(in Chinese).
董云升, 刘文清, 刘建国, 等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 315-320.
- [4] Welton E J, Campbell J R, Spinhirne J D, *et al.* Global monitoring of clouds and aerosols using a network of micropulse lidar systems [C]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 151-158.
- [5] Böckmann C, Wandinger U, Ansmann A, *et al.* Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2. Aerosol backscatter algorithms [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(4): 977-989.
- [6] Murayama T, Sugimoto N, Uno I, *et al.* Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D16): 18345-18359.
- [7] Zhang J S, Chen Z Y, Lu Y H, *et al.*, Characteristics of aerosol size distribution and vertical backscattering coefficient profile during 2014 APEC in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **148**: 30-41.
- [8] Chen Z Y, Liu W Q, Heese B, *et al.* Aerosol optical properties observed by combined Raman-elastic backscatter lidar in winter 2009 in Pearl River Delta, south China [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, **119**(5): 2496-2510.
- [9] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(5): 652-653.
- [10] Wang Xiaoli, Zhang Liang, Wei Yanan *et al.*, Correlation analysis of gaseous pollutions and fine particulate matter about cities [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(1): 1-4(in Chinese).
王晓利, 张 良, 魏亚楠, 等. 城市间气态污染物与细颗粒物的相关性分析 [J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(1): 1-4.