

2019年—2020年秋、冬季淮南市灰霾过程 拉曼-米气溶胶雷达观测研究

张 帅¹, 王 明¹, 施奇兵¹, 叶丛雷¹, 刘 东²

1. 合肥中科光博量子科技有限公司, 安徽 合肥 230088

2. 中国科学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, 安徽 合肥 230031

摘 要 拉曼-米气溶胶激光雷达因无需假设雷达比,而在准确测量气溶胶消光系数方面较传统米散射雷达更具优势。在合肥市的外场探空比对实验结果表明,2.5 km以下拉曼-米激光雷达反演的消光系数更为准确,相差可达 0.04 km^{-1} ,且获取的水汽混合比廓线与探空数据一致性良好。利用该技术获得了2019年—2020年秋、冬季期间淮南市的气溶胶消光系数廓线和边界层高度等数据,进而对空气质量污染期间的污染类型(本地污染排放、传输型污染、传输型污染叠加本地污染累积)和颗粒物的时空演变特征进行了统计分析。结果显示该市在此期间受到20次细颗粒传输和8次沙尘传输影响。其中沙尘传输主要来自西北方向,由高空沉降至近地面(厚度达2 km以上),平均大气边界层高度达1.23 km以上。在典型细颗粒传输过程中,边界层高度基本维持在1.1~1.2 km左右,近地面风向以西北风为主,少量东南风主导。在细颗粒传输叠加本地累积的复合污染过程中,边界层高度略低(平均高度在1.0 km左右),近地面风向以偏北风为主,污染气团自低空出现后,其下沿高度持续降低并最终与近地面污染耦合。在细颗粒导致的重污染过程中,近地面水汽混合比及相对湿度数据与 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度变化趋势一致性良好,说明颗粒物的吸湿性增长和气态污染物二次转化过程可能助推了 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成,加重污染形势。对边界层的统计结果表明,其高度变化对污染气团的沉降和近地面污染累积有十分明显的正相关性。秋冬季期间,该市的小时边界层高度大部分分布在1.6 km以下,平均为1.0 km左右,小时空气质量达重度污染期间,边界层高度普遍不足0.6 km。从气团后向轨迹模拟结果来看,该市空气质量为中度及以上污染期间的气流主要来自偏北方向,少量来自东南沿线,因而污染期间需要加强市区偏北方向污染源的管控,防止叠加影响。

关键词 拉曼-米气溶胶激光雷达;灰霾;沙尘气溶胶;淮南;大气探测

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)08-2484-07

引 言

传统灰霾监测主要依赖于能见度记录和近地面定点测量等手段,仅能反映污染的现状和结果,对灰霾发生的来源、过程以及污染物的空间变化特征无法清晰地把握。基于卫星资料对气溶胶光学厚度的遥感分析,虽然能够获取空间大尺度的探测结果,但时间分辨率较差。较多学者^[1-4]已将颗粒物激光雷达应用于灰霾天气条件下气溶胶的消光廓线探测,大气边界层结构特征研究和颗粒物的来源判识等,弥补了高空数据的缺失,对于大气灰霾的垂直观测有了很大的帮助^[5]。但其消光系数反演中的假设很多,对于反映大气的真

实情况存在一定影响。基于拉曼散射原理设计开发的拉曼激光雷达可用于准确探测大气的消光系数,减少消光系数反演时的激光雷达比假设条件,使得观测结果更贴近实际,但是拉曼信号因为吸收截面($10^{-30} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$ 量级)过小而较为微弱,不易获取。

2006年,谢晨波等成功研制了新型车载式大气探测激光雷达系统,并利用该系统接收的米散射和拉曼散射信号,反演出大气水平能见度,垂直气溶胶消光系数以及水汽混合比等重要数据资料^[6]。2010年,伯广宇等利用研制的激光雷达,对合肥地区夏秋季气溶胶光学性质进行了常规观测,初步判断合肥处在污染型陆地型气溶胶激光雷达比的范围内^[7]。2012年,曹念文等利用拉曼-瑞利-米激光雷达对南京

收稿日期: 2020-08-20, 修订日期: 2020-12-24

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-320)和安徽省重点研究与开发计划项目(1804a0802196)资助

作者简介: 张 帅, 1981年生, 合肥中科光博量子科技有限公司高级工程师 e-mail: zhangshuai@gbqtech.com

北郊低空雾霾进行了观测与分析^[8]。2017 年,吴德成等利用拉曼-米激光雷达测量了对流层大气气溶胶的光学特性^[9]。无论是车载式还是固定式的拉曼-米激光雷达都能反演出大气更多的信息,对于研究大气污染的形成机理有很大的帮助。

2019 年至 2020 年秋冬季期间,皖豫鲁交界地区发生了多次大面积、持续时间长、较为复杂的区域性大气污染过程。淮南市作为污染较为严重的城市之一,在秋冬季期间出现 4 个重度污染和 10 个中度污染天。此外,该市受产业结构及能源结构影响,叠加污染传输的影响,秋冬季空气质量排名一直处于相对靠后的形势。鉴于严峻的大气污染形势和迫切的大气污染防治工作,十分有必要对该市秋冬季期间大气污染的时空演变及污染传输情况进行有效监测,加深对该市大气污染成因的了解,进而指导环境领域与气象领域等多种学科的研究性与业务化工作。

1 实验部分

1.1 资料来源

常规气象监测数据(近地面温度、相对湿度及风场数据)和空气站监测数据(PM_{2.5}与 PM₁₀浓度)分别来自安徽预报预测平台(<http://112.26.143.15:18067/ahemc/home>)和中国环境监测总站公布数据。

拉曼-米激光雷达数据来自合肥中科光量子科技有限公司布置在淮南市气象局院内的拉曼-米激光雷达。其主要监测的物理量为如下 4 种:(1)颗粒物消光廓线(特定的空间坐标点上气溶胶对特定波长光的衰减程度,一般认为消光系数与颗粒物浓度成正比);(2)退偏振比,用来区分球形粒子和非球形粒子的物理量,其值越高,代表非球形粒子的占比越高,是识别二次气溶胶、沙尘、局地扬尘、云等气溶胶的潜在工具;(3)边界层高度:大气边界层高度是大气环境和数值模式的重要物理参数之一,大气污染主要发生在边界层内,与污染物的垂直扩散条件紧密相关;(4)水汽混合比:从接收不同高度上氮气分子和水汽分子的拉曼后向散射光的回波信号中可以获取水汽混合比的垂直廓线。

本研究中主要使用 MeteInfo 结合 TrajStat 来对气象数据进行分析。TrajStat 由 CAWAS、CAMS 的王亚强团队开发。主要功能包括:计算(使用 NOAA HYSPLIT 模式中气团轨迹计算模块)、显示、查询批量的气团轨迹,进行轨迹聚类分析,从而分析观测站点大气成分路径及来源。研究中使用的气象数据是美国国家环境预报中心(NCEP)提供对应时间段的全球资料同化系统(GDAS)数据(UTC,世界时),气象要素场包括水平和垂直风速、温度、气压、相对湿度、降水等,NCEP GDAS 把全球 1°×1°数据插值到正形投影的地图上。

1.2 拉曼-米散射气溶胶激光雷达及原理

拉曼-米激光雷达的详细介绍参见文献^[9-10],其基本工作原理如下:激光器发射出 532 nm 的激光脉冲,激光脉冲经过扩束镜扩束后射出。由望远镜接收大气后向散射信号,通过主镜、副镜以及光阑后,进行光学分光,分为 532 nm 后

向散射平行、垂直偏振信号以及 607 nm 氮气分子散射信号,660 nm 水汽分子散射信号。利用 532 nm 激光的偏振-米散射探测识别大气中气溶胶物理特性,包括非球形粒子(沙尘、卷云粒子)识别,根据水汽分子对激光产生的拉曼散射原理实现探测大气中水汽含量,从接收不同高度上氮气分子和水汽分子的拉曼后向散射光的回波信号中可以获取水汽混合比的垂直廓线。这四路光通过相应的滤光片后照射到 PMT 探测器上,并将这些光信号转化为电信号。再由采集与分析单元采集、反演、分析和显示。通过对原始回波信号进行去除背景噪声、距离平方校正、几何重叠因子订正后,最终得到消光系数廓线、退偏振比廓线,水汽混合比廓线等结果。其原理结构图和主要技术参数见表 1。

表 1 雷达系统的主要参数

Table 1 Main parameters of radar system

雷达系统	参数
激光器发射波长	532 nm
脉冲能量	>150 mJ
发射重复频率	10 Hz
脉冲宽度	<6 ns
望远镜直径	300 mm
收发模式	收发同轴
距离分辨率	7.5 m

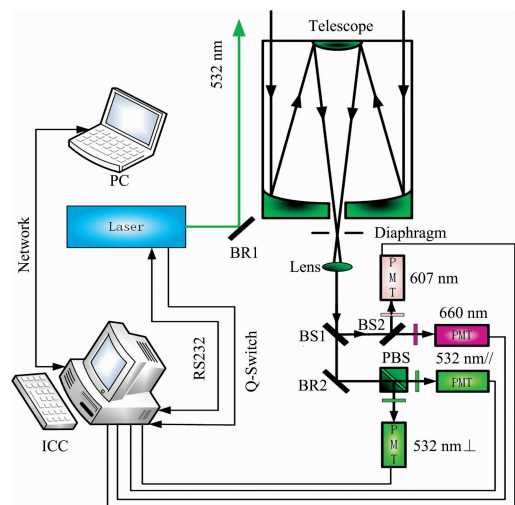


图 1 拉曼-米雷达原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Raman-Mie Lidar

1.3 外场实验

水汽的时空分布对天气变化及颗粒物的二次生成意义重大^[11-12],2019 年 10 月 20 日在合肥市对拉曼-米气溶胶雷达的水汽混合比信号进行了探空比对,结果如图 2(a)所示。比对结果显示在 2.5 km 以下高度拉曼-米雷达的水汽混合比信号(散点廓线图)与探空信号(线条加空心圆框廓线)一致性良好。说明拉曼-米气溶胶雷达对于近地面水汽混合比的反演可以达到很好的效果。

若仅用米散射激光雷达反演消光系数时需要假设激光雷

达比(一般选取为 50 Sr), 图 2(b)中粗点划线为根据该假设反演出的消光系数廓线, 虚线为用拉曼激光雷达反演出的结果。可以看出, 两条廓线趋势基本一致, 但数值有差异, 相差可达 0.04 km^{-1} 左右, 这表明米散射激光雷达反演气溶胶消光系数存在一定的误差。本文的数据处理采用的是拉曼和米散射相结合的方式, 不需要假设激光雷达比, 反演精度更高。

2 结果与讨论

2.1 总体观测结果

利用拉曼-米激光雷达结合气象数据和空气质量监测数据, 对该市在 2019 年至 2020 年秋、冬季期间的空气质量污

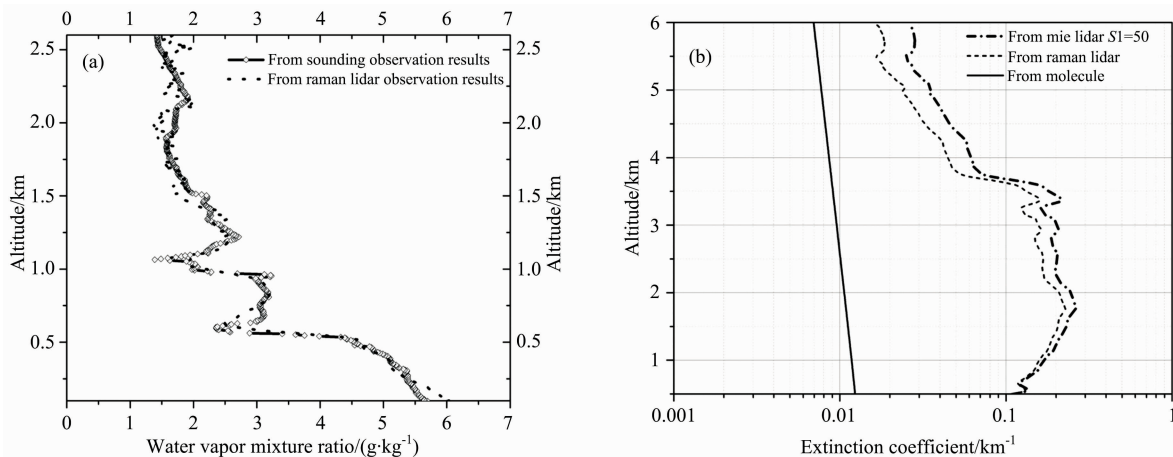


图 2 合肥市外场探空数据与拉曼-米激光雷达观测数据对比结果

(a): 2019 年 10 月 20 日水汽混合比廓线; (b): 2019 年 10 月 16 日瑞利散射、拉曼消光及米散射消光信号

Fig. 2 Comparing results of Sounding observations and Raman-Mie Aerosol Lidar observations in Hefei

(a): The vertical profile of water vapor mixing ratio on October 20, 2019;

(b): The vertical profile of Rayleigh scattering, Raman extinction and Mie scattering extinction signals on October 16, 2019

表 2 2019 年至 2020 年秋冬季期间淮南市部分典型污染过程中的污染类型、气溶胶边界层高度及近地面气象要素信息

Table 2 Results of pollution type, the height of ABL, conventional meteorological information during some typical pollution processes in Huainan City from October 2019 to March 2020

主要污染类型	影响时间	污染气团 沉降时段	小时空气 质量变化	边界层高 度变化/km	平均边界层 高度/km	主导风向	平均风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对湿 度/%	平均气 温/ $^{\circ}\text{C}$	备注
沙尘 污染 传输	2019 年 10 月 28 日 12 时—30 日 10 时	28 日 20 时— 29 日 12 时	中度—重度— 严重污染	2.42—2.73—2.03	2.46	北风	1.31	50	14.4	沙尘传输影响
		29 日 22 时— 30 日 8 时	中度—严重— 重度污染	1.50—1.08—1.87	1.43	东南风转 西北风	3.18	67	9.5	沙尘回流影响
	2020 年 3 月 19 日 4 时—20 日 14 时	19 日 6 时— 19 日 10 时	中度—严重— 轻度污染	0.91—0.70—1.96	1.23	北风	3.06	43	14	沙尘自 3.0 km 高 度沉降近地面
细颗粒 污染 传输	2019 年 11 月 7 日 4 时—10 日 1 时	7 日 10 时— 8 日 10 时	良—中度— 污染—良	1.75—2.03—1.39	1.66	东北风	2.38	66.3	14.3	高空大面积持续 多日细颗粒污染
		8 日 11 时— 10 日 1 时	良—中度— 重度污染	1.24—1.66—0.56	1.14	东北风转 东南风	1.62	67.4	13.3	
	2019 年 12 月 1 日 14 时—3 日 4 时	1 日 14 时— 2 日 3 时	轻度— 重度污染	1.01—1.59—0.56	1.10	西北风	2.26	84.9	3.6	
		2 日 8 时— 3 日 4 时	中度—重度— 中度污染	0.66—1.48—0.57	1.07	西北风	2	76.4	3.1	
	2020 年 1 月 29 日 0 时—31 日 12 时	30 日 0 时— 30 日 12 时	轻度— 重度污染	1.57—1.05	1.19	西北风	2.6	69.1	3.1	
细颗粒污 染传输+ 本地累积	2019 年 12 月 13 日 8 时—14 日 12 时	13 日 8 时— 14 日 6 时	良—重度— 中度污染	1.64—0.60—1.40	1.01	西北风转 东北风	2.1	62.1	9.7	
		2020 年 3 月 03 日 18 时—5 日 4 时	4 日 0 时— 4 日 12 时	良—轻度 污染	0.87—1.21	1.00	北风	2.5	67.1	6.9

染类型(本地污染排放、传输型污染、传输型污染叠加本地污染累积)和典型污染期间的颗粒物时空分布进行了统计分析。统计研究结果显示,该市在此期间受到 20 次细颗粒传输和 8 次沙尘传输影响(部分重污染过程期间的统计结果如表 2 所示)。受到的沙尘影响基本来自高空,随偏北冷空气携带,沙尘污染气团传输沉降至该市,期间该市平均气溶胶边界层高度达 1.23 km 以上,平均风速偏大。几次典型细颗粒传输过程中,边界层高度基本维持在 1.1~1.2 km 左右,近地面风向以西北风为主,少量东南风主导过程,平均风速在 1.6~2.6 m·s⁻¹。在两次细颗粒传输叠加本地污染过程中,边界层高度略低(平均高度在 1.0 km 左右),近地面风向以偏北风为主,平均风速在 1.6~2.6 m·s⁻¹。

2.2 典型沙尘影响致污过程雷达观测结果分析

2019 年 10 月 27 日至 31 日期间该市遭受了一次长时间的沙尘天气影响,导致空气质量经历了从良—轻度—重度—中度—轻度污染的变化过程。图 3 为 532 nm 消光系数日平均值廓线,结果显示 10 月 27 日污染主要集中在 0.5 km 的近地面,28 日因高空沙尘入境,0.5~2.1 km 高度范围内污染明显加重(1 km 以上消光较前日增大 15 倍)。29 日受沙尘主体影响及陆续沉降影响,各高度的消光系数均明显升高,近地面消光增幅达 60%。30 日后随沙尘主体转移及扩散条件转好,污染显著缓解,各高度消光系数均明显下降,31 日各高度消光维持在 0.04~0.26 km⁻¹ 范围,近地面消光系数

降低至 0.13 km⁻¹ 左右。演变过程呈现明显的两个阶段:28 日—29 日(阶段一)为沙尘累积过程,29 日—31 日(阶段二)为沙尘回流和消散过程。

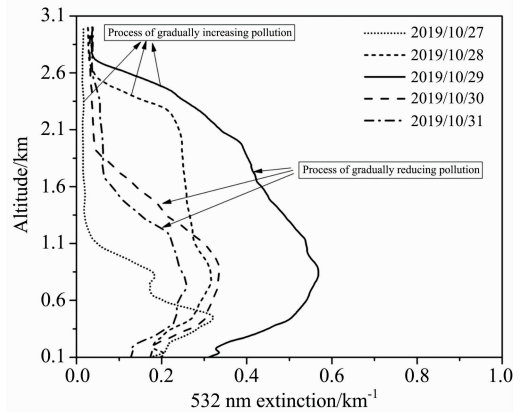


图 3 2019 年 10 月 27 日至 10 月 31 日期间 532 nm 消光系数日变化垂直廓线图

Fig. 3 Vertical profile diagram of diurnal variation of 532nm extinction coefficient from October 27 to 31, 2019

从图 4 所示消光系数廓线图来看,第一阶段沙尘影响主要产生于 28 日午后至 29 日上午期间。28 日 12 时起从近地面到高空突然出现沙尘前锋影响,19 时左右沙尘传输影响

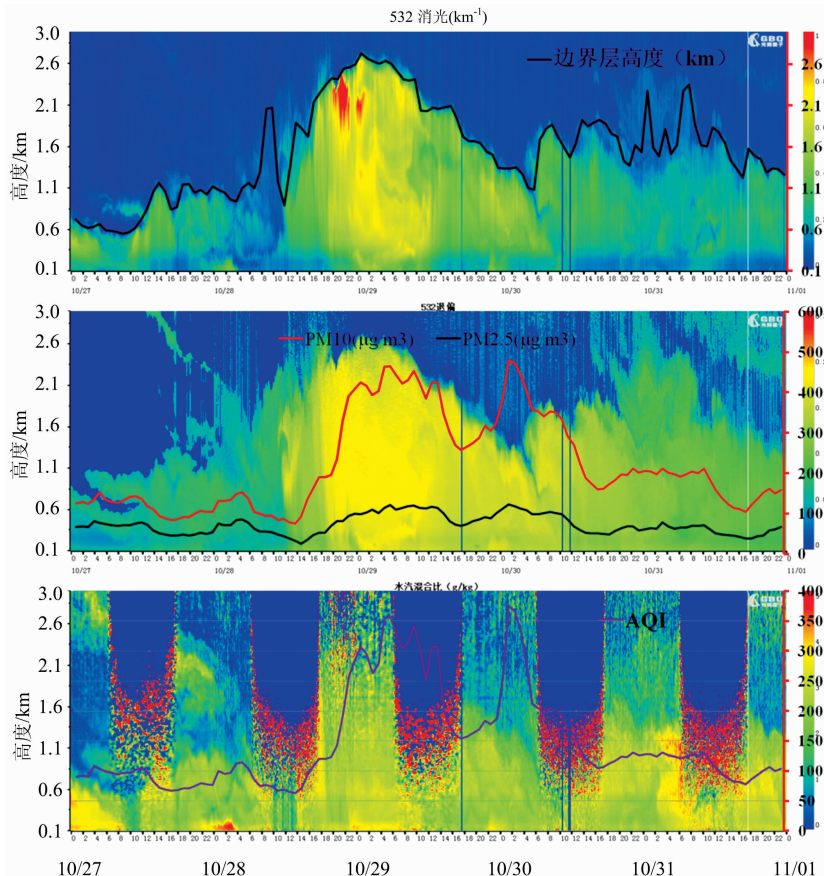


图 4 2019 年 10 月 27 日至 10 月 31 日期间激光雷达和常规空气站观测结果

Fig. 4 The observation results of RMAL and conventional air quality monitoring station from October 27 to 31, 2019

进一步加强, 对应高度的消光系数经历了 $0.15\text{--}0.35\text{--}0.7\text{ km}^{-1}$ 的变化, 退偏振度由 0.06 经 0.14 进一步增大至 0.24 , 表明该市高空充斥大量形状不规则的沙尘粒子, 沙尘几乎自高空到地面同步产生, 厚度最高可达 2.6 km 。从退偏振度的时间演变来看, 近地面的沙尘影响较高空滞后 4 h , 29 日 0 时沙尘主体由高空沉降至近地面, 显著影响当地空气质量, 污染物类型由细颗粒物逐渐转变为沙尘。

从图 5 所示气象要素情况来看, 北风携沙尘抵达该市后, 风速快速降低(由午后的 $3\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至夜间的 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 并持续至 29 日上午), 沙尘在自身重力及垂直气流的影响下逐渐沉降至近地面, 显著影响该市空气质量(28 日夜间至 29 日上午该市受沙尘影响, 超过 16 个小时空气质量达重度及以上污染)。峰值浓度出现在 29 日凌晨 5 时, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别达到 465 和 $121\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量达严重污染级别。5 时后风向由北风逐渐转变为东北风, 风力有所加强, 近地面扩散条件有所好转, 沙尘下沿逐

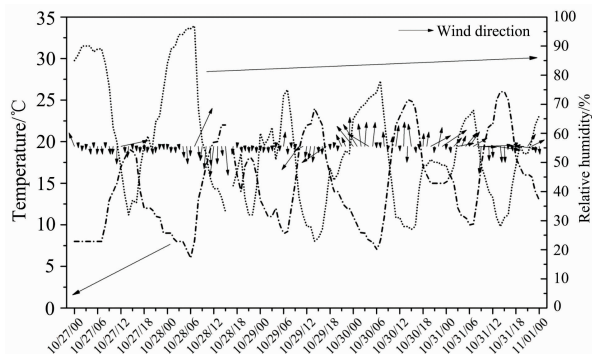


图 5 2019 年 10 月 27 日至 10 月 31 日常规气象要素监测结果

Fig. 5 The observation results of conventional meteorological element monitoring station from October 27 to 31, 2019

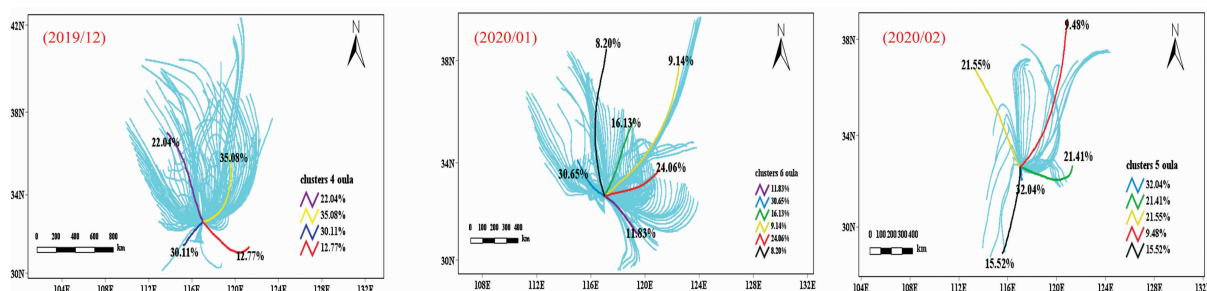


图 6 2019 年 12 月至 2020 年 2 月 500 m 高度气团 24 h 后向轨迹聚类分析结果及 $\text{PM}_{2.5}$ 高值对应的后向轨迹(蓝色轨迹)

Fig. 6 Cluster analysis results of the 24-hour backward trajectory of the 500 m altitude air mass and the backward trajectory corresponding to the high value of $\text{PM}_{2.5}$ (blue trajectory) from December 2019 to February 2020

3 结论

通过拉曼-米激光雷达首次对淮南市 2019 年至 2020 年秋、冬季期间的大气气溶胶进行了测量, 获得了相对准确的消光系数及水汽混合比廓线, 探测结果能够准确判别出污染

渐抬升至 0.4 km 左右高度, 近地面消光系数和退偏振度分别降低至 0.2 km^{-1} 和 0.16 (29 日 17 时), 污染形势有所缓解。

第二阶段(29 日 22 时— 30 日 8 时左右)期间近地面风向为持续的东南风(20 时左右风向由北风转为偏南风), 风力由 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐升高至 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 边界层高度也经历了 $1.5\text{ km}\text{--}1.0\text{ km}\text{--}2.0\text{ km}$ 的变化, 该市也先后受到沙尘回流沉降和抬升转移的过程。显著沙尘回流影响时间段(30 日凌晨), 该市小时空气质量再次恶化至重度-严重污染。

2.3 基于后向轨迹聚类分析的污染来源分析

从图 6 所示, 气流聚类^[12]的结果来看, 淮南市 2019 年 12 月 500 m 高度气团 24 h 后向轨迹聚类分析结果, 图 6 中显示当月该市受到 4 类气流影响: 东北气流, (占比为 35.08%), 西南气流(占比 30.11%), 西北气流(占比为 22.04%) 和东南气流(占比最小为 12.77%)。对每一条气流轨迹赋予对应时刻的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度后, 发现 $\text{PM}_{2.5}$ 大于 $115\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时的后向轨迹主要来自山西方向的西北气流、河北石家庄方向的北部气流和山东方向的东北部气流。

1 月的后向轨迹聚类分析结果显示, 与上月相比, 西南气流明显减少, 来自周口和阜阳沿线的短程西北气流(占比 30.65%) 和江苏的偏东部气流(占比 24.06%) 有所加强, $\text{PM}_{2.5}$ 大于 $150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时的气流也主要来自这两个方向, 西北部和偏东部污染传输是 1 月空气质量较差的重要原因之一。

而 2 月的后向轨迹聚类分析结果显示, 当月该市西南部气流合计占比接近 50% , 为当月主导风向, 其中本地气流占比 32.04% , 其余方向的气流占比均有不同程度的下降。从气流轨迹赋予的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度来看, 在北部气流和东北部气流影响期间, 容易出现中度及以上污染天气。而在本地气流主导期间, 空气质量较好, 很可能与新冠疫情影响期间的各类管控措施导致污染减排有关。

类型(沙尘传输沉降影响、细颗粒污染传输、复合污染等), 结合水汽的廓线和地面空气站监测结果后, 还对污染的来源、特征及趋势进行深入解析, 为该市灰霾过程的形成机理提供了重要依据。

观测结果显示, 该市受到的沙尘影响基本来自高空沉降(厚度达 2 km 以上), 由偏北冷空气携带沙尘污染气团传输

至该市,期间该市平均气溶胶边界层高度达 1.23 km 以上,平均风速偏大。严重污染时沙尘污染气团的退偏振度可达 0.24,消光系数为 $0.4\sim 0.7\text{ km}^{-1}$,同时近地面 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 平均值在 0.28 左右,说明沙尘气团中还掺杂着大量传输沿线城市的球形颗粒。

在典型细颗粒传输过程中,边界层高度基本维持在 1.1~1.2 km 左右,近地面风向以西北风为主,少量东南风主导过程,平均风速在 $1.6\sim 2.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。污染气团产生的消光系数主要在 $1\sim 2.5\text{ km}^{-1}$ 左右,退偏振度为 0.04~0.08,说明污染气团很可能为细颗粒污染与水汽的混合影响。此外,边界层的高度变化对污染气团的沉降和近地面空气质量的变化有十分明显的相关性(12月1日18时至23时边界层高度自 1.58 km 下降至 0.83 km,下降幅度接近

50%,同时近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度增幅分别为 60% 和 56%),说明边界层高度的降低导致淮南市上空的污染气团被持续压缩,致使近地面污染加重。在细颗粒导致的重污染过程中,近地面水汽混合比及相对湿度数据与 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度变化趋势一致性良好,说明颗粒物的吸湿性增长和气态污染物二次转化过程可能助推了 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成,加重污染形势。对边界层的统计结果表明,其高度变化对污染气团的沉降和近地面污染累积有十分明显的正相关性,空气质量小时重度污染期间,边界层高度普遍不足 0.6 km。

总体来看,造成该市出现中度及以上污染的气流主要来自西北山西—河南—阜阳沿线方向、正北石家庄和济南方向及东北海域—潍坊—临沂方向,少量来自苏南—南京沿线,西南部气流期间我市空气质量总体偏好。

References

- [1] QIN Wei, FAN Guang-jiang, ZHANG Tian-shu, et al(秦 玮, 范广强, 张天舒, 等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics (大气与环境光学学报), 2016, 11(4): 270.
- [2] TAO Zong-ming, MA Xiao-min, LIU Dong, et al(陶宗明, 麻晓敏, 刘 东, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2016, 36(6): 0601001.
- [3] WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, et al(王 苑, 邓军英, 史兰红, 等). Environmental Science(环境科学), 2014, 35(3): 830.
- [4] TIAN Xiao-min, LIU Dong, XU Ji-wei, et al(田晓敏, 刘 东, 徐继伟, 等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2018, 13(5): 321.
- [5] LIU Jian-guo, GUI Hua-qiao, XIE Pin-hua, et al(刘建国, 桂华侨, 谢品华, 等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2015, 10(2): 93.
- [6] XIE Chen-bo, ZHOU Jun, YUE Gu-ming, et al(谢晨波, 周 军, 岳古明, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2006, 26(9): 1281.
- [7] BO Guang-yu, XIE Chen-bo, LIU Dong, et al(伯广宇, 谢晨波, 刘 东, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2010, 37(10): 2526.
- [8] CAO Nian-wen, YANG Feng-kai, SHI Jian-zhong, et al(曹念文, 杨丰恺, 施建中, 等). Journal of Applied Optics(应用光学), 2012, 33(5): 979.
- [9] WU De-cheng, LIU Bo, QI Fu-di, et al(吴德成, 刘 博, 戚福弟, 等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2011, 6(1): 18.
- [10] MA Xiao-min, TAO Zong-ming, SHAN Hui-hui, et al(麻晓敏, 陶宗明, 单会会, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2020, 40(11): 1101003.
- [11] LANG Hong-mei, QIN Kai, YUAN Li-mei, et al(郎红梅, 秦 凯, 袁丽梅, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2016, (8): 2260.
- [12] ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, et al(周静博, 段菁春, 王建国, 等). Environmental Science(环境科学), 2020, 41(1): 39.

Study on the Haze Process in Huainan City From October 2019 to March 2020 Observed by Raman-Mie Aerosol Lidar

ZHANG Shuai¹, WANG Ming¹, SHI Qi-bing¹, YE Cong-lei¹, LIU Dong²

1. Hefei CAS GBo-Qua. Science and Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China

2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract The Raman-Mie Aerosol Lidar (RMAL) has advantages over traditional Mie scattering Lidar in accurately measuring aerosol extinction coefficient without assuming radar ratios. The results of the outfield sounding comparison experiment in Hefei indicated that the extinction coefficient retrieved by RMAL below 2.5 km is more accurate than the traditional Mie scattering Lidar with a difference of up to 0.04 km^{-1} , obtained water vapor mixing ratio profiles were consistent well with the sounding. This study presented the long-time observational results of aerosol extinction coefficient and height of atmospheric boundary layer (ABL) data over Huainan City during the autumn and winter from 2019 to 2020 using this technology for the first time. The pollution types (local pollution discharge, transmission pollution, transmission pollution and local pollution accumulation) and spatial-temporal changes of aerosol during the air quality pollution period were analyzed and discussed. The results showed that Huainan City is affected by 20 fine particle air pollution and 8 times dust air pollution during this period. The transportation of dust mainly came from the northwest, and it generally sunk from high altitude to the ground, with a thickness of more than 2 km. The average height of ABL was more than 1.23 km. In the typical fine particle transportation process, the height of the ABL was maintained at about 1.1~1.2 km, and the ground wind direction was mainly northwest, with a small amount of south-east. In the coincidence pollution process of fine particle transmission and local accumulation, the height of ABL was slightly lower (the average height is about 1.0 km), the near-surface wind direction is dominated by northerly winds. The lower edge height of the polluted air masses continued to decrease from low altitude and eventually coupled with near-ground pollution. In the process of heavy pollution caused by fine particles, the evolution trend of surface water vapor mixing ratio, relative humidity and $\text{PM}_{2.5}$ concentration were in good agreement. This showed that increasing moisture absorption of particulate matter and secondary transformation of gaseous pollutants might promote the second generation process of $\text{PM}_{2.5}$. In particular, the trend of atmospheric boundary layer height was closely related to the settlement of polluted air masses and the accumulation of surface pollution. During the attention period, most of the city's hourly height of ABL was distributed below 1.6 km, with an average of around 1.0 km. When the hourly air quality reached severe pollution, the height of the boundary layer was generally less than 0.6 km. According to the simulation results of the backward trajectory of the air mass, the polluted air mass mainly came from the northerly direction, with a small amount came from the southeast, during the air pollution period of the city with moderate or above pollution. Therefore, it is necessary to strengthen the management and control of pollution sources in the north of the urban area to prevent superimposed effects.

Keywords Raman-mie aerosol lidar; Haze; Dust aerosol; Huainan city; Atmospheric detection

(Received Aug. 20, 2020; accepted Dec. 24, 2020)