

引用格式: Cui Jiawen, Chen Jian, Cheng Gaomiao, *et al.* Observation and Analysis of a Sand-dust Weather by Co-operative Ground-based and Space-Borne Lidar[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(2): 416-423. [崔嘉文, 陈健, 成高森, 等. 协同地基和空基激光雷达的沙尘天气观测研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 416-423.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.2.0416

协同地基和空基激光雷达的沙尘天气观测研究

崔嘉文, 陈 健, 成高森, 石 满, 刘佳琪, 祝善友

(南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用紫外地基激光雷达, 结合 CALIPSO 星载激光雷达、MODIS 产品对 2019 年 10 月 28 日至 29 日南京地区一次沙尘污染过程进行观测研究。结果表明沙尘粒子 28 日开始进入南京, 29 日达到污染高峰, 污染主要集中在 2 500 m 高度范围内。沙尘气溶胶易出现分层现象, 上层粒子直径较小, 下层粒子直径较大, 随时间推移上层小粒径沙尘不断沉降, 在近地面与下层污染混合、累积, 导致近地面消光系数持续增高, 进而引起局地沙尘污染现象。结合 HYSPLIT 后向轨迹分析结果, 判定此次南京地区沙尘污染为外部输入, 沙尘可能来源地为内蒙古、蒙古地区, 沙尘粒子随冬季风由北往南输送, 在此过程中不断沉降、累积, 造成区域性污染天气。

关键词: 地基激光雷达; CALIPSO; 沙尘气溶胶; 垂直分布

中图分类号: X831; P412.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)02-0416-08

1 引言

沙尘作为大气气溶胶的重要组成部分, 主要由干旱和半干旱地区的土壤风蚀过程产生, 受植被覆盖、土壤类型和土壤湿度影响较大, 其在大气中的停留时间从几周到几个月不等, 大颗粒的沙尘易发生沉降, 小颗粒的沙尘可在特定的气象场中随气流上升并实现远距离传输, 在传输过程中, 其物理、化学性质也会发生一定的改变。沙尘气溶胶能够导致空气质量恶化, 能见度的降低, 影响人们正常的生产生活及健康, 另一方面沙尘气溶胶具有较强的吸热、降温作用, 影响大气动力过程和地气系统能量收支平衡, 进而影响气候变化^[1-3]。以往针对沙尘的研究, 主要是地面定点观测, 受地面站点分布限制, 以及自然条件等因素的影响, 无法实现大规模监测, 不能满足沙尘灾害的长期监测、预警。遥感技术的发展, 为我们提供了大量的高时空分辨率、高光谱分辨率的遥感数据, 其与地面监测数据相结

合, 使得沙尘的大面积同步观测成为可能。

20 世纪 70 年代, 单通道遥感数据法用于沙尘监测, Shenk 等^[4]利用静止气象卫星的可见、红外通道数据对水面沙尘进行监测, 由于单通道方法受云、地表等背景目标干扰较大, 监测结果不确定性较强; 90 年代后, 多通道方法应用于沙尘监测研究, 取得较好的研究成果^[5]。目前, 国内外学者针对沙尘的遥感监测研究开展较多, 例如, 祁佳丽等^[6]用 EOS/MODIS 数据对青海省以此沙尘天气进行监测, 并对沙尘传输路径进行分析; 陈科艺等^[7]等利用 OMI 卫星资料对沙尘的远距离传播进行预报研究, 在蒙古地区应用效果较好。Salehi 等^[8]利用 CALIPSO 和多源遥感数据对 2006~2018 年米索不达亚地区大气状况进行分析, 结果表明沙尘较其他类型气溶胶消光系数与退偏比更高。同时, 统计多沙尘案例发现, 沙尘主要分布于 1~3.5 km 高度。尚丽萍等^[9]利用 MODIS 数据采用深蓝算法对西北地区不

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项(61527805), 国家自然科学基金项目(41776181)。

作者简介: 崔嘉文(1997—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事气溶胶遥感研究。E-mail: 1783796440@qq.com

通讯作者: 陈 健(1978—), 男, 山东淄博人, 副教授, 主要从事定量遥感、遥感与 GIS 应用研究。E-mail: chjnju@163.com

同季节的沙尘气溶胶的时空分布进行研究,发现该地区的沙尘有明显的季节性特征,且沙尘量与气溶胶光学厚度呈现明显的正相关性。Zhao 等^[10]利用 MODIS 和 CALIPSO 数据针对兰州地区的沙尘气溶胶进行监测,研究结果表明气溶胶光学厚度与扬尘含量呈现明显的正相关,并利用 HYSPLIT 轨迹模型分析了沙尘来源和传输路径。杨欣等^[11]利用地基激光雷达数据针对北京春季一次沙尘天气进行监测,监测结果表明,沙尘粒子含量与 AOD 和近地面消光系数呈现明显正相关性。

由于沙尘气溶胶光学特性复杂,影响范围广,而光学遥感数据在沙尘监测研究时,只能获取沙尘气溶胶大气整层气柱内的光学厚度及其水平空间分布信息,无法获取垂直方向上不同高度气溶胶分布状况;CALIPSO 星载雷达可获取垂直方向上气溶胶粒子信息,但由于其扫描成像方式,只能获取瞬时信息,无法对单一地点进行持续成像观测,且云量较多时,无法获取地面至云层间的大气信息。地基雷达作为主动遥感方式,可全天时、不间断获取垂直方向上高时空分辨率的信息,对沙尘气溶胶的垂直分布、光学特性具有较好的监测效果,同时也为卫星遥感数据提供验证。

本研究综合利用地基雷达、星载雷达、卫星数据对沙尘的垂直结构、时空分布特征进行综合观测,并结合 HYSPLIT 后向轨迹模式对沙尘的可能传输路径、尘源地进行判断。

2 研究数据和方法

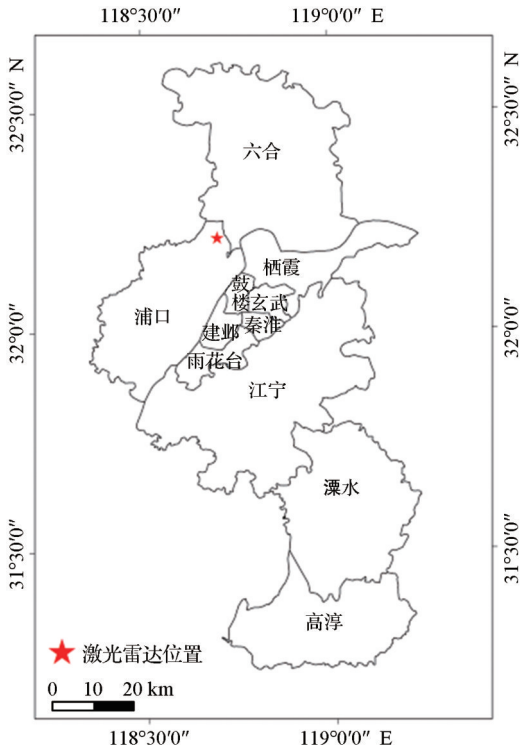
2.1 研究数据

2.1.1 地基激光雷达数据

本研究使用的眼安全型紫外偏振激光雷达为单站激光雷达,在进行探测时,激光发射器发射 355 nm 激光脉冲,在大气的传播过程中与各种原子、分子、气溶胶粒子发生相互作用,发生包括反射、折射、吸收和各种散射等各种光学现象,进而使得能量和回波信号的曝光量强度或波长发生改变。接收镜接收到的后向散射信号,剔除太阳背景噪声信号后,进入光电倍增管。光电倍增管将光信号转换成电信号,实现了光电转换的功能,最后由数据存储器存储信息。雷达的具体的系统参数如表 1 所示。

研究中雷达位于南京信息工程大学北辰楼顶(32.44° N, 118.86° E),其布设位置如图 1 中黑色五角星标记所示,数据获取时间为 2019 年 10 月 28 日

16:08 至 10 月 29 日 09:53。



审图号:GS(2019)1822

图 1 地基激光雷达位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of ground-based lidar position

表 1 激光雷达系统参数

Tab.1 System Parameters of Lidar

| 发射器 | 仪器参数 |
|---------|-----------------|
| 激光器类型 | Nd:YAG laser |
| 波长 | 355 nm |
| 激光能量 | 30 mJ |
| 脉冲重复频率 | 20 Hz |
| FWHM 带宽 | 0.5 nm |
| 主镜尺寸 | 200 mm |
| 视场 | 0.25~3 mrad |
| 采样时间分辨率 | 1 s 或 10 s 多种方式 |
| 空间分辨率 | 7.5 m |
| 探测高度 | 10~15 km |

2.1.2 CALIPSO 数据

云—气溶胶激光雷达和红外探路卫星, CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 是由美国宇航局和法国国家空间研究中心联合发射,其上搭载了正交偏振云—气溶胶激光雷达 CALIOP,可针对气溶胶和云的垂直分布信息进行观测,具有探测范围广、分辨率高的特点,可有效地识别云的成分、气溶胶的类型等^[12-13]。

CALIOP 接收来自 3 个通道的回波信号,包括 1 064 nm 的后向散射信号和 532 nm 后向散射信号的正交偏振分量,其水平分辨率最高可达 333 m,垂直分辨率最高可达 30 m,因此该数据可以较好地应用于云和气溶胶垂直分布状况的研究。因其有偏振监测的功能,通过 532 nm 后向散射信号的正交偏振分量可以计算退偏比,用于反映粒子的不规则程度,从而进行非球形粒子的识别^[14]。利用 532 nm 和 1 064 nm 两个通道信号可以计算色比,用于反映气溶胶粒子的粒径大小,色比越大,其粒径越大^[15]。综合偏振比和色比信息,可以判断气溶胶的类型,如本研究利用 CALIPSO 数据与地基激光雷达数据进行了对比分析,并进一步确定了本次实验中的气溶胶类型。

研究使用了 L1 级数据中的 532 nm 垂直与水平方向后向散射系数、1 064 nm 总后向散射系数, L2 级气溶胶类型数据。

2.1.3 MODIS 数据

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 是搭载在 Terra 和 Aqua 极地轨道卫星上的主要仪器之一,其波谱探测范围覆盖了从可见光到热红外 (0.4~14.4 μm) 共 36 个波段,其最大空间分辨率可达 250 m。MODIS 可以提供全球陆地、云边界、云特性、海洋水色、浮游植物、生物地理、化学、大气中水汽、地表温度、云顶温度、大气温度、臭氧和云顶高度等遥感产品,用于对陆表、生物圈、固态地球、大气和海洋进行长期全球观测。

研究使用了 MODIS Terra 和 Aqua C6 暗像元—深蓝算法融合的 550 nm 波段的气溶胶光学厚度 (AOD, Aerosol Optical Depth) 数据,其分辨率为 3 km,以此来分析南京地区沙尘天气的气溶胶时空分布状况,并与地基雷达探测结果做对比。

2.1.4 HYSPLIT 模式

HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated) 即拉格朗日混合单粒子轨道模型,该模型是由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的空气实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模

型,该模型可以处理多种气象要素输入场、多种物理过程以及不同类型污染物排放源功能的较为全面的输送、扩散和沉降模式^[16-17]。

研究使用 HYSPLIT 后向轨迹模式,利用 NOAA 全球预报系统数据 (GFS),分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,选取南京市 (32.44°N , 118.86°E) 为模拟轨迹的终点,模拟高度选择为 500 m、1 500 m、2 500 m,进行 72 h 的后向轨迹模拟,以分析研究区沙尘天气期间,污染源的可能来源及传输路径。

2.2 雷达方程求解

理论上,激光雷达可探测 120 km 以下高度大气中的尘埃、云雾等粒子的光学特性。从接收的回波信号得到气溶胶粒子的光学特性,需要进行激光雷达回波信号反演,其接收的回波信号为:

$$P(r) = \frac{P_0 \cdot n \cdot Q(r) \cdot \beta(r) \cdot \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right]}{r^2} + P_{bgr} \quad (1)$$

其中: $P(r)$ 代表激光雷达接收到高度 r 处的大气后向散射信号能量; P_0 为雷达发射强度; n 为器件总效率; $Q(r)$ 为雷达重叠函数; $\beta(r)$ 为后向散射系数; $\alpha(r)$ 为消光系数,单位是 m^{-1} ; P_{bgr} 为背景噪声。

目前关于雷达方程求解方程算法主要有以下 3 种: Collis 的斜率法^[18]、Klett^[19] 的分析反演算法和 Fernald^[20] 方法。

由于研究主要观测 0~6 km 高度内的气溶胶垂直方向的光学特性,因此选择 Fernald 后向算法来求解雷达方程。后向算法一般以距离地面 6 km 的高度为定标高度,假设此高度为几乎不含气溶胶粒子的清洁大气层,所以激光雷达回波强度为该高度处大气分子后向散射系数,由此高度引入大气气溶胶粒子,可以得到下一层处气溶胶后向散射系数、消光系数,依次迭代计算,得到大气层底处气溶胶后向散射系数、消光系数。

Fernald 算法假定大气分子和大气气溶胶粒子各自的后向散射和消光系数是分开的。则雷达方程可表示为:

$$P(r) = \frac{P_0 \cdot n \cdot Q(r) \cdot [\beta_{mol}(r) + \beta_{aer}(r)] \cdot \exp \left[-2 \int_0^r [\alpha_{mol}(r') + \alpha_{aer}(r')] dr' \right]}{r^2} + P_{bgr} \quad (2)$$

其中:下角标 mol 代表大气分子; aer 代表大气气溶胶。

假设大气分子、气溶胶各自的后向散射系数 $\beta(r)$ 、消光系数 $\alpha(r)$ 有如下线性关系:

$$L_{mol} = \frac{\alpha_{mol}(r)}{\beta_{mol}(r)} = \frac{8\pi}{3} \quad (3)$$

$$L_{aer} = \frac{\alpha_{aer}(r)}{\beta_{aer}(r)} \quad (4)$$

其中: L_{mol} 为大气分子的雷达率,取固定值50; L_{aer} 为气溶胶的雷达率,又称消光后向散射比,与气溶胶粒子谱分布、形状、化学组分有关,存在显著的时空变化; β_{mol} 为空气分子后向散射系数,通过散射理论可以得到其精准值。

结合雷达率,去除背景信号 P_{bgr} 的回波强度

$$\beta(r) = \frac{RCS(r) \exp \left[2(L - L_{mol}) \int_r^{r_{ref}} \beta_{mol}(r') dr' \right]}{\frac{RCS(r_{ref})}{C \cdot \beta_{mol}(r_{ref})} + 2L \int_r^{r_{ref}} RCS(r') \exp \left[2(L - L_{mol}) \int_r^{r'} \beta_{mol}(r'') dr'' \right] dr'} \quad (7)$$

其中:

$$C = \frac{\beta_{mol}(r_{ref}) + \beta_{aer}(r_{ref})}{\beta_{mol}(r_{ref})} \quad (8)$$

其中: r_{ref} 为6 km定标高度,假定此高度没有气溶胶,则 $\beta_{mol}(r_{ref})$ 为0,此时 $C=1$ 。

至此,在确定了雷达方程的边界条件及大气后向散射系数之后,由公式(7)进行逐步迭代计算得到气溶胶的后向散射系数和消光系数。

3 结果与讨论

3.1 沙尘天气描述

2019年10月28日中央气象台发布内蒙古中东部、东北地区西部、华北、黄淮东部等部分地区有4~6级以上大风,并伴有扬沙或浮尘天气;北京市28日也发布沙尘蓝色预警信号,全市大部分地区有浮尘和扬沙天气。

为了分析沙尘天气的空间分布和发展情况,本文获取了2019年10月27日至30日中国地区的MODIS-AOD产品,空间分辨率为3 km。

图2为中国区域2019年10月27日至30日AOD分布图,空间分辨率为3 km。由图可知,27日山东北部有较轻程度的污染,AOD值范围在0.5~1.0;28日时,鲁豫冀交界处受沙尘天气影响较为严重,AOD值较高,濮阳、菏泽、聊城等地AOD达到2.0左右;29日,污染物往长三角地区输送,使得长三角地区南京、滁州等城市大气质量下降,此区域AOD值达到1.5左右,形成区域性污染;30日时,污染主要集中在江苏境内,且污染状况有所缓解,AOD值在0.8左右。

3.2 沙尘气溶胶的垂直分布

图3为2019年10月28日至29日南京地区地基激光雷达观测结果反演得到的气溶胶垂直方向上消光系数时序图。由图可知,2019年10月28日19

$S(r)$,经过距离订正的回波强度($RCS(r)$)分别为:

$$S(r) = P(r) - P_{bgr} \quad (5)$$

$$RCS(r) = S(r) \times r^2 = n \cdot P_0 \cdot Q(r) \cdot [\beta_{mol}(r) +$$

$$\beta_{aer}(r)] \times \exp[-2 \int_0^r \alpha_{mol}(r') + \alpha_{aer}(r')] dr' \quad (6)$$

因此,后向散射信号可表示为:

时前,南京地区气溶胶消光系数整体较低,颗粒物的浓度较低;19时开始,外来污染开始输入,使得近地面消光系数开始增长,污染物高度达到1 500 m,消光系数高值达到0.8 KM^{-1} ;19时至21时污染有所缓解,消光系数整体有所下降,气溶胶出现分层现象,上层位于2 000 m高度,消光系数在0.5 KM^{-1} 左右,下层位于500 m高度,消光系数在0.4 KM^{-1} 左右;至28日24时,污染物高度有所攀升,达到2 500 m高度,气溶胶持续出现分层现象,消光系数值未有明显变化。

10月29日0时起,污染达到峰值,近地面500 m高度内,消光系数值迅速增长,达到1 KM^{-1} ,上层1 500~2 500 m高度颗粒物浓度上升,消光系数达到0.6 KM^{-1} ;至4时,近地面污染物持续积累,消光系数值稳定维持在0.9 KM^{-1} 以上,上层气溶胶浓度持续升高,消光系数持续增长,达到0.8 KM^{-1} ;4时至7时,上层污染物发生沉降,并在近地面与下层污染物混合、积累,此时污染物主要集中在2 000 m高度内,消光系数持续稳定在1 KM^{-1} 左右;7时起,污染物高度持续下降至1 000 m,近地面消光系数开始降低,表明颗粒物浓度有所降低,污染状况有所缓解。

图4分别为CALIPSO雷达获取的退偏比、颜色比、气溶胶类型数据,CALIPSO过境时间为2019年10月29日2时18分。由于CALIPSO雷达过境的扫描轨迹未与地基雷达的位置完全重合,研究中假定CALIPSO扫描轨迹线上最接近地基雷达处的大气状况与地基雷达布设位置相似,故选择图中红框区域。

如图框中所示,CALIPSO探测结果与地基雷达探测结果较吻合,均在2 500 m高度内出现大量气溶胶污染物,且主要集中在500 m高度内,高空污染物分布较少。由图4(a)退偏比结果可知,南京地

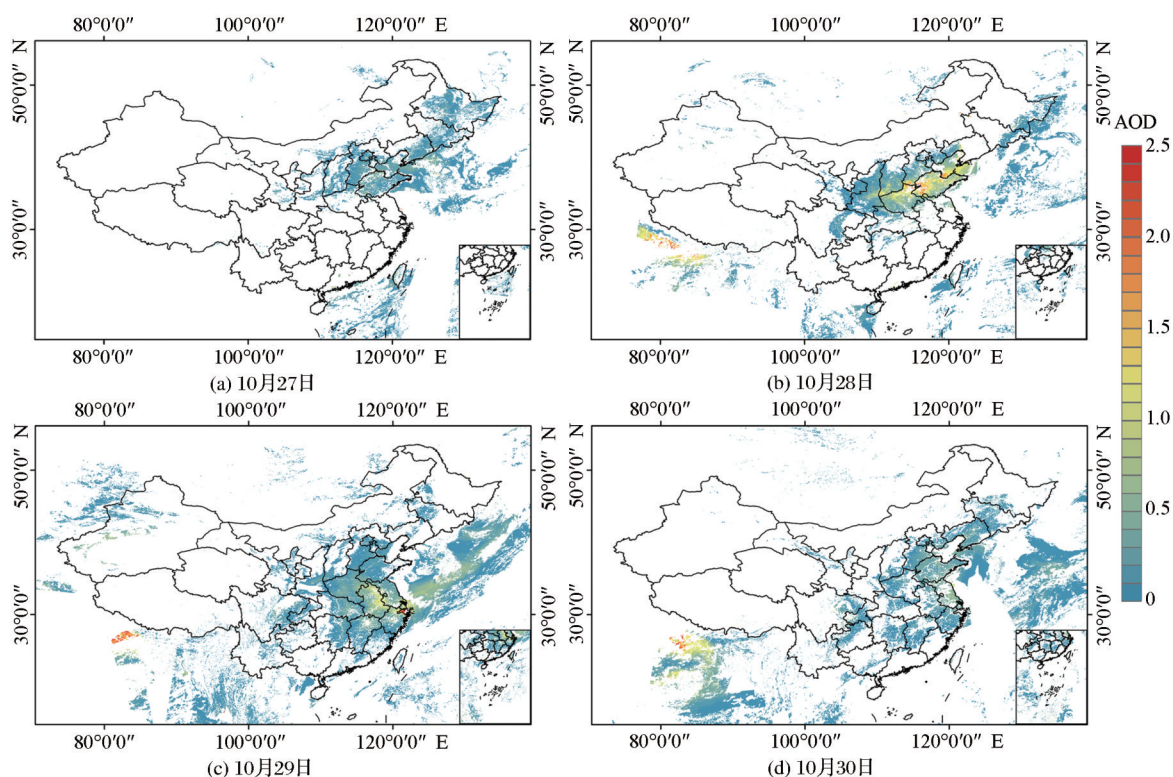


图2 2019年10月27日至30日MODIS气溶胶光学厚度

审图号:GS(2019)1822

Fig.2 MODIS Aerosol Optical Depth results on October 27~30, 2019

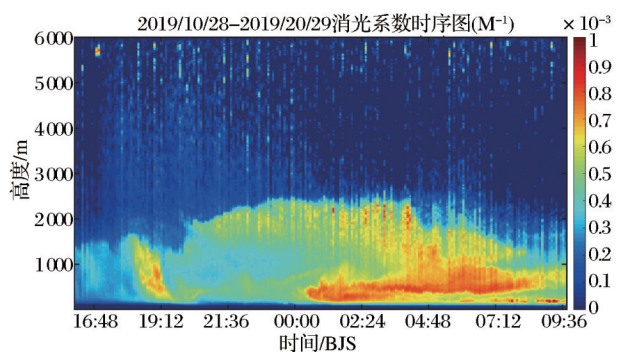
图3 2019年10月28~29日南京地基雷达消光系数
时空分布图

Fig.3 Space-time distribution of aerosol extinction coefficient from Oct 28 to 29 in 2019 in Nanjing

区29日2时,2500 m高度内粒子退偏比较高,在0.2~0.3之间,2500 m高度以上大气分布均匀,污染物较少,说明近地面的气溶胶粒子较不规则;由图4(b)色比结果可知,该时刻2500 m高度内,气溶胶粒子的色比值较高,在0.8~1之间,且越接近地面处色比值越高,高层大气的色比较低,该结果表明研究区的近地表2500 m高度内大气中的气溶胶粒子直径较大;结合图4(c)气溶胶类型结果可知,研究区29日2时的气溶胶为沙尘气溶胶。综上,CALIPSO观测结果与上述地基雷达观测结果垂直分布上较

为一致,表明地基雷达观测结果较为可靠。

图5为地基雷达观测结果反演得到的0~6 km高度的AOD与距离雷达测站最近的空气检测站点—浦口测站PM逐小时数据图。对比AOD与PM_{2.5}数据发现,两者在时间变化上有较好的一致性,也表明地基雷达在大气污染状况监测方面具有较高的可靠性。

3.3 沙尘气溶胶的水平分布及发展

由上述对地基激光雷达、CALIPSO数据分析可知,该时间段南京地区的主要污染物为沙尘气溶胶。为了进一步分析沙尘的可能来源和空间分布情况,本研究获取了2019年10月29日南京地区的MODIS-AOD产品,空间分辨率为3 km。

图6为2019年10月29日10时南京地区空气质量分布图,由于MODIS的AOD产品受云影响,局部区域没有AOD反演结果,故利用南京地区空气质量监测站获取的最邻近时刻的AQI数据作为补充。由图6可知,29日南京地区气溶胶值整体水平在0.9以上,且呈现西南较高,东北较低的趋势,AOD高值区域达到1.8。结合上述地基雷达、CALIPSO研究结果,受沙尘影响,29日南京地区整体空气质量较差。

图7为HYSPLIT后向轨迹模式72 h模拟结果,

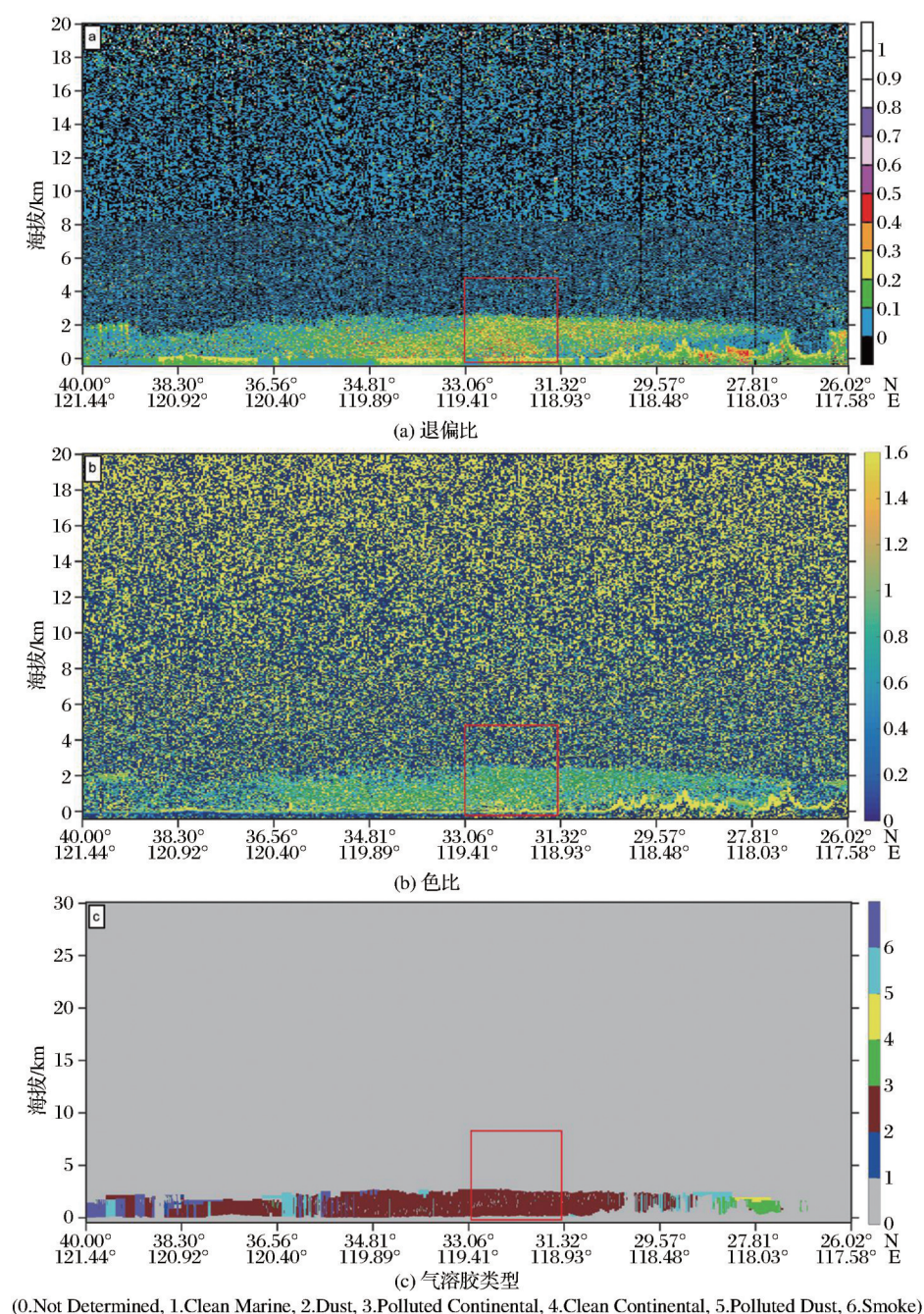


图4 2019年10月28日CALIPSO观测结果

Fig.4 Results of CALIPSO on Oct 28, 2019 in Nanjing

模拟终点为地基雷达布设区(32.44°N , 118.86°E), 模拟高度分别为500 m、1 500 m、2 500 m。由图可知, 南京地区2019年10月28日~29日沙尘污染主要来自外部输送。其中, 500 m高度气流26日起自俄罗斯境内经我国内蒙—山西—河北—山东地区往东南输送, 28日到达鲁豫冀地区, 最终到达长三角地区; 1 500 m高度气流26日起自蒙古国境内经我国内蒙—陕西—河南, 往长三角地区输送, 28日到达鲁豫冀地区, 最终到达长三角地区;

2 500 m高度气流自中亚地区经俄罗斯—蒙古国—我国内蒙—山西—河北—山东, 28日到达蒙古国, 最终到达长三角地区。沙尘污染物在整个输送过程中, 气流高度不断降低, 使得沙尘得以在近地面沉降、积累, 同时28日至29日气流运动较缓慢, 造成了区域性污染天气。

4 结 语

(1)地基雷达较传统遥感手段相比, 可全天时

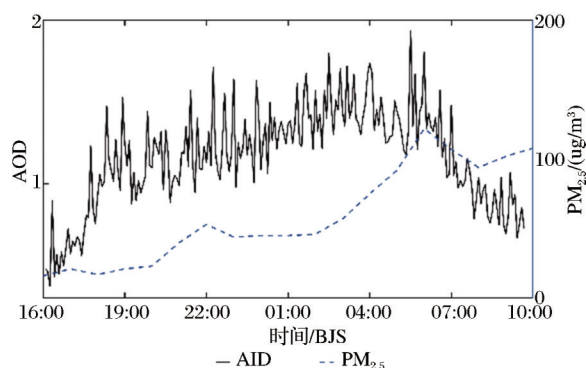
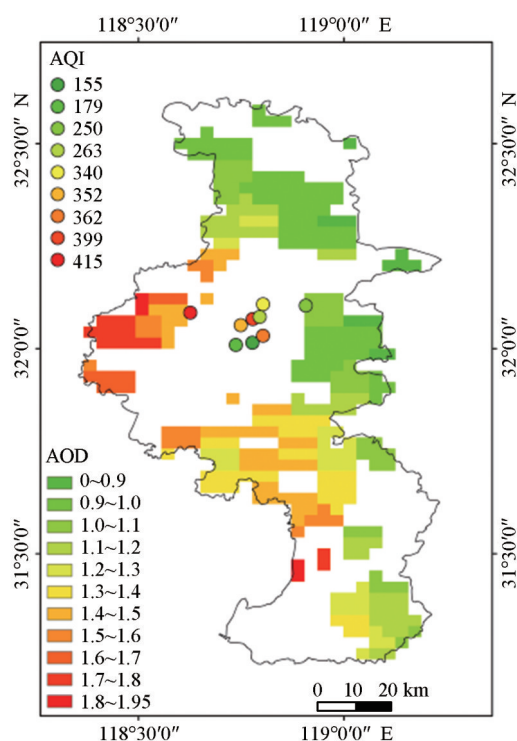


图5 2019年10月29日南京地区AOD、PM_{2.5}时序图

Fig.5 Figure of AOD and PM_{2.5} on Oct 28, 2019 in Nanjing



审图号:GS(2019)1822

图6 2019年10月29日南京地区空气质量示意图

Fig.6 Diagram of Air quality on Oct 28, 2019 in Nanjing

获取气溶胶垂直分布信息,且时间分辨率、垂直方向空间分辨率较高。本研究使用的地基雷达工作波段为355 nm,时间采样间隔可达1 s,空间分辨率为7.5 m,相对传统532 nm探测高度更高,对人眼更安全。利用地基激光雷达对南京地区一次沙尘天气进行观测,探测结果对比CALIPSO数据,两者较吻合,表明地基雷达在气溶胶垂直分布监测方面完全可行,并有较大潜力。

(2)地基雷达、CALIPSO观测结果表明,沙尘气溶胶输入初期,气溶胶消光系数迅速升高,并出现分层现象,大颗粒沙尘粒子集中在下层,小颗粒

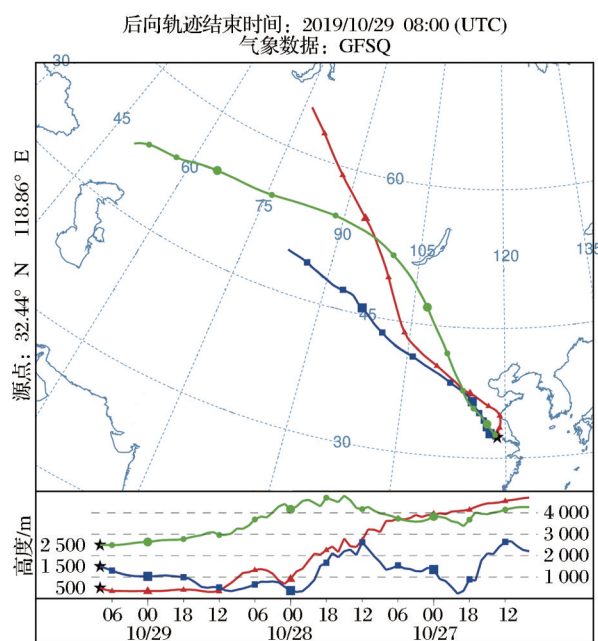


图7 72 h HYSPLIT后向轨迹图

Fig.7 HYSPLIT backward trajectories in 72 hours

分布在上层,上层沙尘气溶胶随时间推移发生沉降,并在近地面与下层沙尘气溶胶混合,在近地表不断累积,使得近地面消光系数持续升高。

(3)综合地基雷达、CALIPSO雷达、MODIS多源遥感数据及HYSPLIT模式,对南京地区一次沙尘进行监测研究,结果表明,此次沙尘污染为外部输入,可能来源于蒙古国、我国内蒙地区。沙尘自蒙古国、我国内蒙地区随气流运动,向东南输送,并不断沉降、积累,导致2019年10月28日~29日,南京及周边地区持续性污染天气。

本研究利用地基激光雷达对沙尘天气进行监测,对气溶胶垂直分布有较好的监测能力,但受雷达站点限制,无法实现大范围水平分布监测,需结合多源数据进行综合分析,以探讨区域大气环境变化。且地基雷达工作时受到天气状况影响较大。因此,后续研究中希望利用多地的地基雷达进行长时间观测,并结合多源遥感数据对研究区内典型天气状况下气溶胶光学特性进行研究,从而分析南京地区污染源和污染的传输过程,为大气污染防治提出合理意见。

参考文献(Reference):

- [1] Li Zhanqing. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: an overview[J]. Transactions of Atmo-

- sphere Sciences, 2020, 43(1):76-92.[李占清.气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述[J].大气科学学报,2020,43(1):76-92.]
- [2] Fan shenghu, Zhang feiyun. Analysis of sandstorm and its components in Urumqi city using atmospheric super analysis of a sandstorm and its components in Urumqi city using atmospheric super station[J]. Arid Environmental Monitoring, 2021, 35(1):15-22.[范圣虎, 张飞云. 利用大气超级站对乌鲁木齐市一次沙尘天气过程及组份的分析[J]. 干旱环境监测, 2021, 35(1):15-22.]
- [3] Zhao Shiwei, Xu Yongwen, Shi Huiyan, *et al.* Research and prospect of remote sensing monitoring on Chinese sand-dust disaster[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009, 32(4):65-68.[赵仕伟, 胥永文, 史荟燕, 等. 我国沙尘灾害遥感监测研究与展望[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(4):65-68.]
- [4] Shenk W E, Curran R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements[J]. Monthly Weather Review, 1975, 102(12). DOI:10.1175/1520-0493(1974)102<0830:TDODSO>2.0.CO;2.
- [5] Fang Zongyi, Zhang Yungang, Zheng Xinjiang, *et al.* The method for monitoring dust devil using satellite and preliminary results[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(1):48-55.[方宗义, 张运刚, 郑新江, 等. 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1):48-55.]
- [6] Qi Jiali, Li Shengshou, Li Shumin. The remote sensing monitoring of a typical sand dust in qinghai province based on EOS/MODIS images[J]. Environmental Monitoring Forewarning, 2018, 10(4):19-23.[祁佳丽, 李生寿, 李淑敏. 基于EOS/MODIS影像的青海省一次典型沙尘遥感监测[J]. 环境监测与预警, 2018, 10(4):19-23.]
- [7] Chen Keyi, Peng Zhiqiang, Monitoring sand-dust transport in mongolia gobi using OMI data[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(3):798-803.[陈科艺, 彭志强. 应用OMI卫星资料监测蒙古戈壁沙尘的传播[J]. 高原气象, 2012, 31(3):798-803.]
- [8] Salehi M, Masoumi A, Moradhaseli R.A study on the vertical distribution of dust transported from the Tigris - Euphrates basin to the Northwest Iran Plateau based on CALIOP/CALIPSO data[J]. Atmospheric Pollution Research, Volume 12, Issue 12, 2021, 101228, ISSN 1309-1042. DOI: org/10.1016/j.apr.2021.101228.
- [9] Shang Liping, Wang Tianhe. Spatial and temporal variation characteristics of dust aerosols in atmospheric environment in Northwest China[J]. Gansu Science and Technology, 2018, 34(16):19-22.[尚丽萍, 王天河. 西北地区大气环境中沙尘气溶胶的时空变化特征[J]. 甘肃科技, 2018, 34(16):19-22.]
- [10] Suping, Zhao, Ye, *et al.* Urban particle size distributions during two contrasting dust events originating from Taklimakan and Gobi Deserts[J]. Environmental Pollution, 2015, 207:107-122. DOI:org/10.1016/j.envpol.2015.08.052
- [11] Yang Xin, Chen Yizhen, Liu Houfeng, *et al.* Measurement on a spring time dust aerosol pollution process in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, 37(1):87-94.[杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 北京春季一次沙尘气溶胶污染过程观测[J]. 中国环境科学, 2017, 37(1):87-94.]
- [12] Hara Y, Nishizawa T, Sugimoto N, *et al.* Optical properties of mixed aerosol layers over Japan derived with multi-wavelength Mie - Raman lidar system[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2016: S0022407316300929. DOI:10.1016/j.jqsrt.2016.06.038.
- [13] Kumar A, Singh N, Anshumali, *et al.* Evaluation and utilization of MODIS and CALIPSO aerosol retrievals over a complex terrain in Himalaya[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 206:139-155. DOI:10.1016/j.rse.2017.12.019.
- [14] Hu Y, Winker D, Vaughan M, *et al.* CALIPSO/CALIOP cloud phase discrimination algorithm[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 26(11):2293-2309.
- [15] Omar A H, Winker D M, Kittaka C, *et al.* The CALIPSO automated aerosol classification and Lidar ratio selection algorithm[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(10):1994-2014.
- [16] Wang Lina, Yang Lili, Yang Yanping, *et al.* Comprehensive analysis of a sandstorm in northwest China based on multiple data[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2021, 16(5):392-403.[王莉娜, 杨丽丽, 杨燕萍, 等. 基于多源资料的西北地区一次沙尘暴天气过程综合分析[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(5):392-403.]
- [17] Wang Qian. Study of air pollution transportation source in Shanghai using trajectory model[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(4):357-363.[王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4):357-363.]
- [18] Collis R, Russell P B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1976.
- [19] Klett James D. Lidar calibration and extinction coefficients[J]. Applied Optics, 1983, 22(4):514-0. DOI: 10.1364/AO.22.000514.
- [20] Fernald F G. Analysis of atmospheric Lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5):652-653. DOI:10.1364/AO.23.000652.