

## 激光与光电子学进展

寿县一次沙尘过程气溶胶谱分布和光学特性的  
阶段性特征

董德保\*, 张广元, 陆大春, 何越

安徽省大气探测技术保障中心, 安徽 合肥 230031

**摘要** 利用三波长偏振激光雷达和气溶胶在线监测仪器的协同观测, 获取了 2021 年 1 月 14 日—16 日寿县国家气候观象台一次沙尘过程气溶胶垂直分布、粒子数浓度、质量浓度、散射特性和能见度观测数据, 并结合常规地面气象观测资料, 分析了沙尘过程气溶胶微物理、光学特性及垂直分布的阶段性演变特征。结果表明: 沙尘过境期间气溶胶粒子总数浓度峰值为  $5431 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{10}$  质量浓度峰值为  $447.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度比为  $0.43 \pm 0.10$ 。沙尘、霾和晴空阶段下的气溶胶谱分布均可表示为 2 个细粒模和 1 个粗粒模的叠加, 沙尘阶段气溶胶粒子数显著高于晴空和霾阶段, 2 个细粒模的粒子几何平均半径基本一致, 在粗粒模中, 沙尘阶段的粒子几何平均半径为  $2.24 \mu\text{m}$ , 明显大于晴空阶段的  $1.74 \mu\text{m}$  和霾阶段的  $1.79 \mu\text{m}$ 。沙尘阶段气溶胶总散射系数平均值大于霾阶段和晴空阶段, 其后向散射比较小, 空气中以较大的沙尘粒子为主。3 个波长的气溶胶消光系数垂直分布变化趋势基本一致, 沙尘阶段气溶胶层高度扩展至近地面  $3.0 \text{ km}$ , 退偏振比基本大于 0.1, Angström 指数在 0.1~0.4 范围。

**关键词** 大气光学; 气溶胶; 谱分布; 光学特性; 空气污染监测

中图分类号 P401 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1901002

Stageful Characteristics of Aerosol Spectral Distribution and Optical  
Properties During a Dust Episode in Shouxian

Dong Debao\*, Zhang Guangyuan, Lu Dachun, He Yue

Anhui Center of Atmospheric Observation Technology, Hefei 230031, Anhui, China

**Abstract** Observation data of aerosol vertical distribution, particle number concentration, mass concentration, scattering characteristics, and visibility were captured using three-wavelength polarization lidar and online aerosol-monitoring instruments during a dust episode at Shouxian National Climate Observatory from January 14 to 16, 2021. These data, combined with the conventional surface meteorological observation data, were then used for analyzing the stageful evolution characteristics of aerosol microphysics, optical properties, and vertical distribution during the dust episode. The results show that the peak value of the total number concentration of aerosol particles in the transit of dust is  $5431 \text{ cm}^{-3}$ , the mass fraction peak value of  $\text{PM}_{10}$  is  $447.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and the mass fraction ratio between  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  is  $0.43 \pm 0.10$ . Furthermore, the aerosol spectrum distribution in the dust, haze, and clear-sky stages could be expressed as the superposition of two fine-grained modes and one coarse-grained mode. The number concentration of aerosol particles in the dust stage is significantly higher than that in the haze and clear-sky stages, and the geometric average radius of particles in the two fine-grained modes is basically the same. In the coarse-grained mode, the geometric average radius of particles in the dust stage is  $2.24 \mu\text{m}$ , which is significantly higher than  $1.74 \mu\text{m}$  in the clear-sky stage and  $1.79 \mu\text{m}$  in the haze stage. The average value of the total scattering coefficient in the dust stage is greater than those in the haze and clear-sky stages. In the dust stage, the backscattering ratio of the aerosol particles is found to be smaller, indicating that the air is dominated by larger dust particles. The vertical distribution trend of the aerosol-extinction coefficient at three wavelengths is found to be basically the same, and the extinction coefficient in the dust stage is greater than those in the haze and clear-sky stages. The height of the aerosol layer in the dust stage extends to  $3 \text{ km}$  near the ground, the depolarization ratio is basically greater than 0.1, and the Angström index is in the range 0.1–0.4.

**Key words** atmospheric optics; aerosol; spectral properties; optical properties; air pollution monitoring

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-06-15; 录用日期: 2022-06-22

基金项目: 中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(2021KLAS03M)、安徽省气象局研究型业务攻关项目(YJG202102)

通信作者: \*ddbao@mail.ustc.edu.cn

# 1 引言

沙尘作为一种自然界气溶胶源,可通过长距离输送影响区域或全球气候变化,同时对生态环境、空气质量、人体健康和交通安全等方面产生重要影响<sup>[1-5]</sup>。随着我国经济社会的快速发展和城镇化建设的加快推进,化石燃料能源消耗增加,大气气溶胶颗粒排放显著增多。同时由于人类活动和土地资源的利用以及春季亚洲内陆地区频发的沙尘暴等,大量沙尘颗粒物被注入大气,大气中的沙尘气溶胶浓度呈上升趋势<sup>[5-6]</sup>,在不利的天气条件下,大气气溶胶颗粒出现累积效应,造成大气污染事件频发,特别是以大气颗粒物为代表的区域污染得到社会的广泛关注<sup>[7-8]</sup>。气溶胶谱分布、质量浓度和光学特性等的变化可以表征气溶胶污染过程演变特征<sup>[9-11]</sup>,开展气溶胶在线监测与应用研究是科学应对大气污染治理和气候变化的有效途径。

寿县地处中国南北气候过渡带,位于我国江淮之间,属于北亚热带半湿润季风气候。该地区冬春季节寒冷,以间隙性降水为主,总体干旱少雨。从地理位置来看,寿县远离内陆沙尘暴高发区,受沙尘暴侵袭相对较少。利用美国能源部 2008 年 5 月—12 月实施的国家大气辐射测量计划 (Atmospheric radiation measurement, ARM) 中国寿县移动观测站数据, Fan 等<sup>[11]</sup> 结合中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 资料研究了气溶胶光学特性,发现气溶胶光学特性具有显著昼夜变化特征,并给出了农业秸秆燃烧和远距离沙尘输送对气溶胶负荷和特性的影响。丁辉等<sup>[12]</sup> 利用微脉冲激光雷达探测大气混合层高度和气溶胶垂直结构,给出了混合层高度日变化特征,发现混合层高度的发展滞后于气溶胶光学厚度 0.5~3 h。陆祖荣等<sup>[13]</sup> 分析了沙尘天气对大气气溶胶光学特性的影响,沙尘过境气溶胶消光系数最大

值达到  $1.1 \text{ km}^{-1}$ , 波长指数最低值达到 0.21。利用寿县国家气候观象台气溶胶在线监测数据,霍彦峰等<sup>[14]</sup> 统计分析了气溶胶光学特性的日变化、季节变化及气流轨迹来源,其具有明显的双峰结构日变化特征,秋冬季节较高,夏季最低,来自人为活动频繁区的气溶胶比来自西北地区的气溶胶后向散射较大。魏夏潞等<sup>[15]</sup> 研究了黑碳气溶胶浓度变化及影响因子,表明黑碳气溶胶年平均浓度逐年递减,冬季最高,是夏季的 2.9 倍,风要素对寿县黑碳气溶胶浓度影响最大。利用太阳-天空辐射计 CE318 遥感测量数据,范伟等<sup>[16-17]</sup> 研究了气溶胶光学和微物理特性的季节变化特征,春季气溶胶光学厚度最高,夏季和秋季最为接近,冬季介于夏、秋季之间,四季气溶胶体积谱分布基本相似,细模态和粗模态粒子并存。基于寿县黑碳吸收增强和氧化剂的观测, Xu 等<sup>[18]</sup> 研究表明大气中的黑碳粒子老化良好,大气光化学老化对黑碳吸收增强发挥作用。目前还未见到关于寿县沙尘污染过程气溶胶垂直分布、粒子谱分布、散射等光学特性阶段性演变的协同观测研究报道。通过对 2021 年 1 月 14 日—16 日寿县国家气候观象台 ( $116^{\circ} 46' \text{ E}$ ,  $32^{\circ} 30' \text{ N}$ ) 一次沙尘污染过程的多仪器连续在线协同观测,获取气溶胶和气象要素监测资料,研究寿县沙尘过程气溶胶垂直分布、粒子谱、散射特性的阶段性演变特征,以及与气象要素的关系,可为该地区大气颗粒物污染防治、区域性气候特征研究等方面提供支撑。

## 2 仪器与方法

利用 LDJ-01 三波长偏振激光雷达、GRIMM180 大气颗粒物监测仪、Aurora 浊度仪、DNQ2 能见度仪和 DZZ3 自动气象站等仪器,在寿县国家气候观象台开展逐 5 min 时间分辨率的协同观测,各种仪器性能参数如表 1 所示。偏振激光雷达发射 355 nm、532 nm 和 1064 nm 三波长激光脉冲,望远镜接收气溶胶、云等后

表 1 观测仪器主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of observation instruments

Instrument	Item	Time resolution / min	Observation accuracy
LDJ-01	Extinction coefficient	5	$\leq 20\%$ (0.5~5.0 km), $\leq 40\%$ (2.0~5.0 km)
	Depolarization ratio		
	Angstrom index		
	Number concentration		
GRIMM180		5	$\pm 5\%$ ( $> 1 \text{ cm}^{-3}$ )
Aurora3000	$\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_1$	5	$\pm 3 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ( $\leq 500 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )、 $\pm 5 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ( $> 500 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
	Total scattering coefficient		$\pm 0.3 \text{ Mm}^{-1}$
DNQ2	Backscattering coefficient	1	$\pm 10\%$ ( $\leq 1.5 \text{ km}$ ), $\pm 20\%$ ( $> 1.5 \text{ km}$ )
	Visibility		
DZZ3	Humidity	1	$\pm 2\%$ ( $\leq 90\%$ ), $\pm 3\%$ ( $90\% \sim 100\%$ )
	Precipitation		$\pm 2\%$
	Wind speed		$\pm 0.3 \text{ m/s}$

向散射 355 nm、532 nm 平行、532 nm 垂直、1064 nm 信号光,通过对后向散射信号光解析,得到其消光、退偏振比等参数。大气颗粒物监测仪是利用光散射原理测量气溶胶粒子数浓度和质量浓度<sup>[19]</sup>,波长 685 nm 的激光束照射到颗粒物发生 Mie 散射,散射光经反射镜(与入射光成 90°)30°聚焦后被光电二极管探测器接收,按照散射信号强度把粒径分为 0.25、0.28、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5、0.58、0.65、0.7、0.8、1.0、1.3、1.6、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0、6.5、7.5、8.5、10.0、12.5、15.0、17.5、20.0、25.0、30.0、32.0、>32.0 μm 等 32 个通道,并得到相应粒径通道上的大气颗粒物数量<sup>[20-21]</sup>,

$$M_n = \sum_{i=1}^n \frac{4}{3} \pi \cdot \bar{R}_i^3 \cdot \bar{\rho}_i \cdot N_i$$

( $M_n$  为  $n$  通道粒子的质量浓度; $n$  为颗粒物粒径的总通道数; $i$  为颗粒物的粒径通道数, $\bar{R}_i$  为第  $i$  通道粒径范围内粒子的平均半径; $\bar{\rho}_i$  为第  $i$  通道粒径范围内粒子的平均密度; $N_i$  为第  $i$  通道粒径范围内粒子的个数)来计算得到  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_1$  的质量浓度<sup>[22]</sup>。浊度仪可以直接测量红、绿、蓝 3 个波段(中心波长为 450 nm、525 nm、635 nm)的散射系数和后向散射系数<sup>[23]</sup>。能见度仪采用前向散射法测量大气消光系数,通过 Koschmider 原理换算得到能见度<sup>[24]</sup>。通过定期维护清理仪器采样头、检查滤膜带装置、自检测试和校准样气流量,确保观测仪器运行稳定可靠;同时采用滑动中值滤波等数据质量控制方法,对沙尘污染过程气溶胶协

同观测和常规气象要素监测数据进行质量控制,剔除显著异常测量值。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 气溶胶浓度与气象要素分析

图 1 给出了寿县沙尘污染过程气溶胶  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_1$  的质量浓度、相对湿度、能见度、风速变化特征,从 1 月 14 日 00 时至 1 月 15 日 06 时, $PM_{10}$  质量浓度维持在  $200 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  以下, $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的质量浓度比为  $0.60 \pm 0.10$ 。15 日 06 时之后,伴随着西北偏北风的增大(风向图略), $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_1$  质量浓度均随之增大,其中  $PM_{10}$  变化幅度较大,其峰值达到  $447.2 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;至 16 日 08 时风向转变为东北偏东风,且风速增大, $PM_{10}$  呈较大下降趋势,期间  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的质量浓度比为  $0.43 \pm 0.10$ ,表明粗粒子占比大,同时相对湿度小,能见度低,表征为典型沙尘污染特征<sup>[25]</sup>。按照霾的观测识别<sup>[26]</sup>,可把能见度低于 10 km 的沙尘污染过程外的时段标识为霾过程。能见度大于 10 km 的时段可标识为晴空天气。观测期间共有 864 组有效观测数据,可分为沙尘污染阶段 307 组,霾阶段 325 组,晴空阶段 232 组。图 2 给出了气溶胶数浓度演变特征,在沙尘污染阶段,图 2(a) 显示不同粒径的气溶胶粒子数浓度均呈增大趋势,图中  $dN/d(\lg r)$  为单位体积对数数浓度,图 2(b) 显示总数浓度显著增大,最大值为  $5431 \text{cm}^{-3}$ ;在晴空阶段,总数浓度较沙尘阶段明显偏小,基本小于  $150 \text{cm}^{-3}$ 。

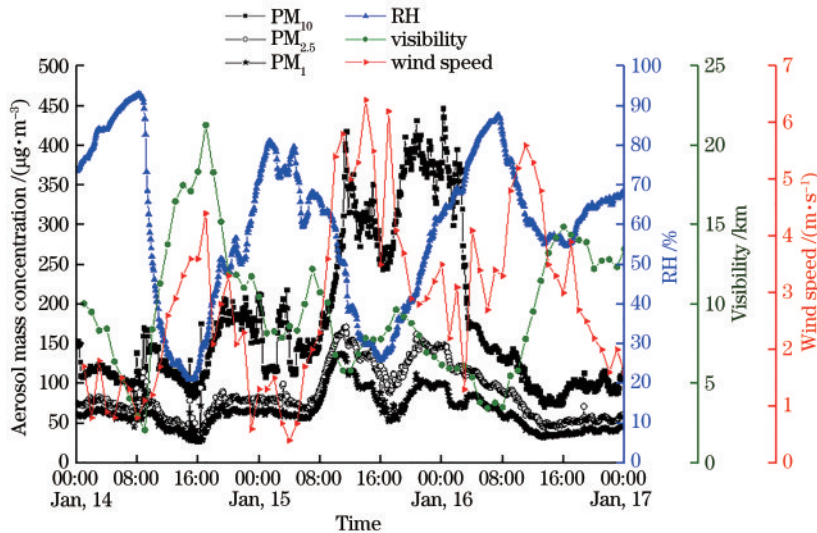


图 1 2021 年 1 月 14 日—16 日寿县一次沙尘过程气溶胶质量浓度与气象要素变化

Fig. 1 Evolution diagram of aerosol mass concentration and meteorological element during a dust episode in Shouxian from January 14 to 16, 2021

#### 3.2 气溶胶谱分布特征

粒子谱分布是气溶胶微物理特征关键参数之一,其能够表征大气中细粒子和粗粒子组成,利用董德保等<sup>[27]</sup>提出的方法,假定颗粒物为球形,且在测量通道的粒径范围内粒径相等,记为  $r$ ,各测量通道的粒子数浓度为  $N_r$ ,则在测量范围内气溶胶颗粒物的表面积和体

积浓度可写为  $\frac{dS}{dr} = \pi r^2 N_r$ ,  $\frac{dV}{dr} = \frac{\pi}{6} r^3 N_r$ 。图 3 给出了沙尘、霾和晴空条件下气溶胶粒子数浓度、表面积浓度和体积浓度谱分布。

可以看出霾、晴空和沙尘阶段的气溶胶谱分布特征趋于一致,而 3 个阶段的数浓度、表面积浓度和体积

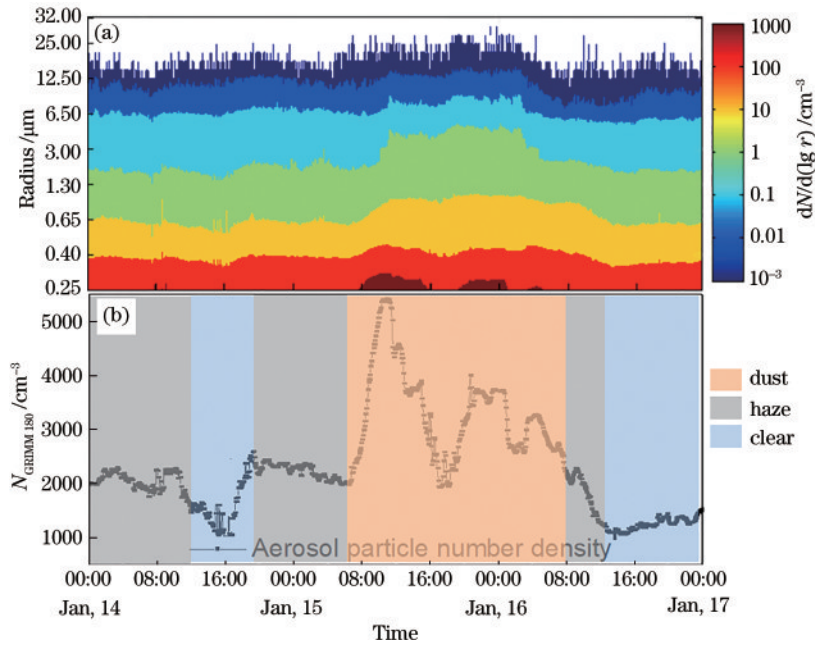


图 2 气溶胶粒子数浓度的时间变化。(a)不同粒径尺度;(b)总数浓度

Fig. 2 Temporal variation of aerosol number concentration. (a) Different particle size scales; (b) total number concentration

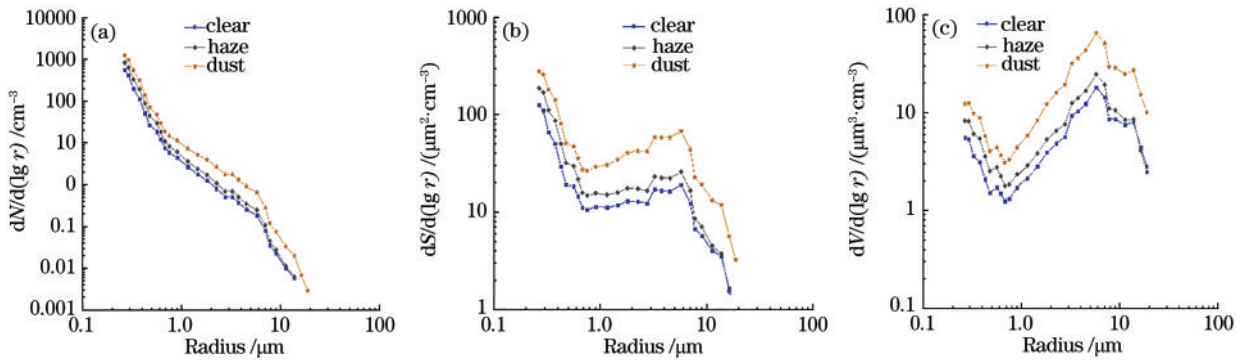


图 3 不同阶段气溶胶谱分布。(a)数浓度;(b)表面积浓度;(c)体积浓度

Fig. 3 Aerosol spectral distribution at different stages. (a) Number concentration; (b) surface area concentration; (c) volume concentration

浓度在量值上呈现较大的差异,沙尘阶段大于霾阶段,霾阶段大于晴空阶段。Whitby<sup>[28]</sup>和Hussein等<sup>[29]</sup>研究表明气溶胶粒子谱分布可以通过拟合多对数正态分布函数表征,多对数正态分布函数可表示为

$$n(r) = \frac{dN}{d(\lg r)} = \sum_{i=1}^n \frac{N_{0,i}}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_{g,i}} \exp\left[-\frac{\lg r - \lg r_{g,i}}{2 \lg^2 \sigma_{g,i}}\right] \quad (1)$$

式中: $r$ 为气溶胶粒径; $N_{0,i}$ 为单位体积气溶胶粒子数; $\sigma_{g,i}$ 为几何方差标准偏差; $r_{g,i}$ 为几何平均半径, $N_{0,i}$ 、 $\sigma_{g,i}$ 、 $r_{g,i}$  3个参数为第*i*个对数正态分布函数。

表 2 给出了沙尘、霾和晴空条件下实测气溶胶粒子数浓度谱在细粒模和粗粒模上的对数正态拟合参数,可以看出不同条件下的粒子谱均为 2 个细粒模和 1 个粗粒模的叠加,无中间模态,这与鲁先洋等<sup>[30]</sup>得到的合肥地区(距寿县国家气候观测台约 70 km)气溶胶粒子谱分布基本相同。气溶胶粒子主要集中在细粒模,沙尘阶段气溶胶粒子数显著高于霾和晴空阶段,不同阶段 2 个细粒模的粒子几何平均半径基本一致;在粗粒模中,沙尘阶段的粒子几何平均半径为 2.24  $\mu\text{m}$ ,

表 2 不同阶段粒子谱对数正态拟合参数

Table 2 Parameters of log-normal distribution fitting of particle size in different stages

Stage	Fine mode			Coarse mode		
	$r_{g,1}, r_{g,2} / \mu\text{m}$	$\sigma_{g,1} / \sigma_{g,2}$	$N_{0,1} / N_{0,2}$	$r_{g,3} / \mu\text{m}$	$\sigma_{g,3}$	$N_{0,3}$
Clear	0.23, 0.13	0.24/0.65	103.37/189.98	1.74	1.15	5.52
Haze	0.23, 0.16	0.28/0.55	176.60/298.07	1.79	1.15	7.41
Dust	0.23, 0.13	0.30/0.61	275.78/591.20	2.24	0.90	13.41

明显大于霾阶段的  $1.79 \mu\text{m}$  和晴空阶段的  $1.74 \mu\text{m}$ 。

### 3.3 气溶胶散射特性

图 3(a) 和图 3(b) 分别给出了 2021 年 1 月 14 日—16 日 450 nm、525 nm 和 635 nm 3 个波段气溶胶总散射系数  $\sigma_{\text{scat}}$  和后向散射比  $\sigma_{\text{bsca}}/\sigma_{\text{scat}}$  的演变特征, 其中  $\sigma_{\text{bsca}}$  是气溶胶粒子的后向散射系数。气溶胶总散射系数演变呈现明显的双峰型变化, 峰值分别出现在 15 日 11 时前后和 15 日 23 时前后, 这与图 2(b) 演变特征一致; 3 个波长的总散射系数变化趋势基本一致, 波长越大, 总散射系数越小。气溶胶后向散射比表征了气溶胶中细粒子含量, 图 3(b) 显示 14 日 14 时前后, 气溶胶后向散射比出现较大尖峰, 表明了空气中细粒子含量占比大, 这与午后空气温度达到最大, 相对湿度最低, 气溶胶粒子表面水汽蒸发, 粒子变小, 其质量浓度也随之变小有关, 与图 1 的观测相吻合; 3 个波段的气溶胶后向散射

比变化趋势基本一致, 与总散射系数演变特征不同, 在 15 日 06 时之后的沙尘过境期间, 气溶胶后向散射比较小, 说明细粒子含量占比小, 以较大的沙尘粒子为主。对不同阶段过程的气溶胶总散射系数和后向散射比统计分析, 可以得到 450 nm、525 nm 和 635 nm 3 个波段沙尘阶段总散射系数平均值分别为  $504.10 \pm 152.55 \text{ Mm}^{-1}$ 、 $417.24 \pm 122.81 \text{ Mm}^{-1}$  和  $344.39 \pm 97.00 \text{ Mm}^{-1}$ , 霾阶段分别为  $318.58 \pm 61.85 \text{ Mm}^{-1}$ 、 $258.36 \pm 49.96 \text{ Mm}^{-1}$  和  $207.99 \pm 39.70 \text{ Mm}^{-1}$ , 晴空阶段分别为  $201.81 \pm 47.11 \text{ Mm}^{-1}$ 、 $161.68 \pm 39.47 \text{ Mm}^{-1}$  和  $133.13 \pm 33.57 \text{ Mm}^{-1}$ ; 3 个波段沙尘阶段后向散射比平均值分别为  $0.05 \pm 0.016$ 、 $0.062 \pm 0.019$  和  $0.054 \pm 0.019$ , 霾阶段分别为  $0.074 \pm 0.015$ 、 $0.095 \pm 0.019$  和  $0.10 \pm 0.022$ , 晴空阶段分别为  $0.116 \pm 0.026$ 、 $0.15 \pm 0.033$  和  $0.14 \pm 0.029$ 。

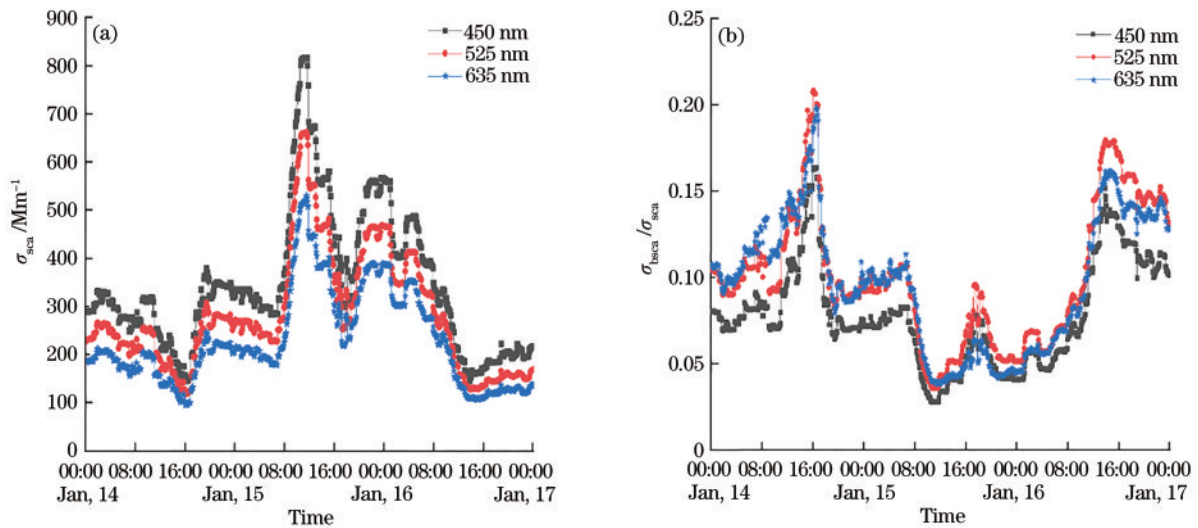


图 4 气溶胶散射特性的时间变化。(a)总散射系数;(b)后向散射比

Fig. 4 Temporal variation of aerosol scattering characteristics. (a) Total scattering coefficient; (b) backscattering ratio

### 3.4 气溶胶光学特性垂直分布

三波长偏振激光雷达通过探测沙尘过程的气溶胶消光系数、退偏振比、Angström 波长指数等参数, 可以得到气溶胶浓度分布、形状规则和粒子大小特征信息, 如图 5 所示。

14 日午后, 三波长偏振激光雷达 355 nm、532 nm 和 1064 nm 通道气溶胶消光系数垂直分布出现小的尖峰, 其对应 Angström 指数  $\delta = \ln \frac{\alpha_{532}}{\alpha_{1064}} / \ln \frac{1064}{532}$  较小, 结合图 1 中午后地面风速增大, 可考虑为风速增大卷起扬尘引起高空气溶胶相关观测值变化。14 日夜间至 15 日凌晨, 寿县上空气溶胶消光系数维持较低水平, 而 Angström 指数出现较大峰值, 最大值达 0.88, 可以推测夜晚气温下降, 相对湿度增大, 空气中易挥发性物质因吸湿产生气粒转换形成气溶胶, 导致出现较大的 Angström 指数。15 日 06 时开始, 沙尘影响到寿县地区, 沙尘颗粒物垂直分布高度扩展至近地面 3.0 km

处, 沙尘在寿县过境引起空气中的气溶胶浓度急剧增大, 图 5(a)、图 5(b) 和图 5(c) 显示了 355 nm、532 nm 和 1064 nm 通道气溶胶消光系数均增大, 图 5(d) 表明了输入的气溶胶粒子形状不规则, 退偏振比大于 0.1, 图 5(e) 显示了 Angström 指数  $\delta$  在 0.1~0.4 范围, 明显变小, 表征输入的气溶胶为半径较大的沙尘粒子, 其不同于背景气溶胶和局地产生的气溶胶粒子。16 日 08 时后, 沙尘气溶胶浓度降低, 气溶胶层高度有所下降, 由于空气中较大气溶胶粒子沉降作用, 没有外来输入, 空气相对干净, 532 nm 通道气溶胶消光系数小于  $0.2 \text{ km}^{-1}$ , 退偏振比小于 0.1, Angström 指数基本大于 0.4, 呈现增大趋势, 如图 5(f) 所示。鉴于上述的特征分析, 通过三波长偏振激光雷达连续观测, 能够反演沙尘气溶胶输送信息。

为分析沙尘气溶胶来源, 利用美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的全球同化系统 (GDAS) 气

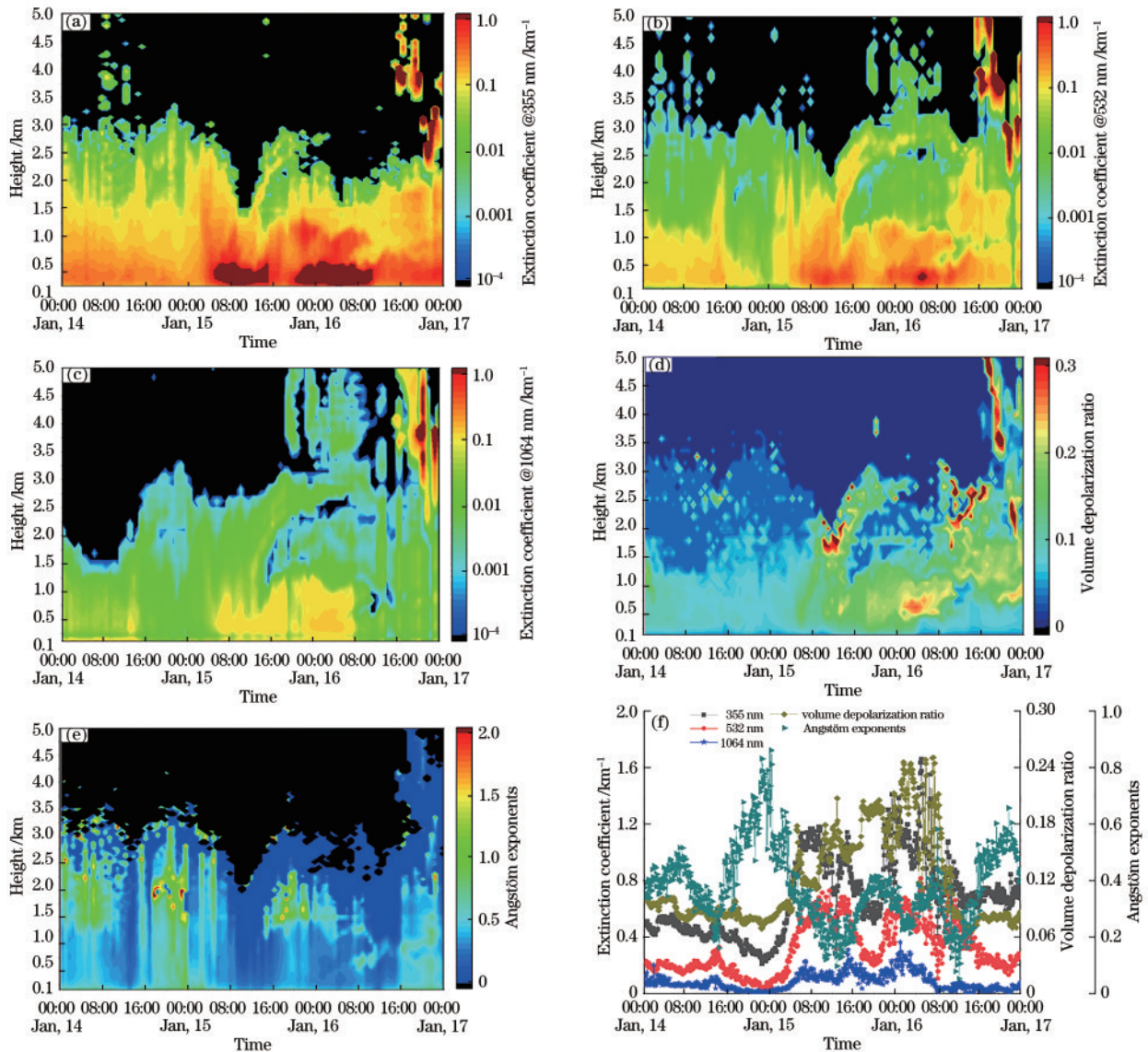


图5 三波长偏振激光雷达测量气溶胶垂直分布。(a) 355 nm 消光系数;(b) 532 nm 消光系数;(c) 1064 nm 消光系数;(d) 退偏振比;(e) Angstrom 指数;(f) 0.5 km 高度层气溶胶光学特性

Fig. 5 Vertical distribution of aerosol measured by three-wavelength polarization lidar. (a) 355 nm extinction coefficient; (b) 532 nm extinction coefficient; (c) 1064 nm extinction coefficient; (d) depolarization ratio; (e) Angstrom index; (f) optical properties of aerosol at 0.5 km height

象资料进行后向轨迹分析, 轨迹模型 HYSPLIT\_4<sup>[31-32]</sup> 选择起始点为寿县 (32.50°N, 116.77°E), 从北京时 2021 年 1 月 15 日 08 时追溯至 1 月 13 日 20 时进行计算。从 2.0 km 和 3.0 km 层气溶胶后向轨迹可知 (后向轨迹图略), 寿县上空沙尘主要来源于我国内蒙古西部、甘肃河西走廊一带的沙尘气团的输送; 而 0.5 km 层气溶胶来自于湖北地区, 受大别山脉阻挡, 其后向轨迹由西南北上转西北偏南下影响寿县地区。

## 4 结 论

2021 年 1 月 14 日—16 日寿县地区沙尘过境期间气溶胶粒子总数浓度和质量浓度显著增大。沙尘、霾

和晴空阶段下的气溶胶谱分布趋于一致, 粒子谱均可表示为 2 个细粒模和 1 个粗粒模的叠加, 无中间模态; 不同阶段 2 个细粒模的粒子几何平均半径基本一致, 在粗粒模中, 沙尘阶段的粒子几何平均半径为 2.24  $\mu\text{m}$ , 明显大于霾阶段和晴空阶段。沙尘阶段气溶胶总散射系数平均值大于霾阶段和晴空阶段, 空气中以较大的沙尘粒子为主。3 个波长的气溶胶消光系数垂直分布变化趋势基本一致, 沙尘阶段气溶胶层高度扩展至近地面 3 km, 退偏振比基本大于 0.1, Angstrom 指数在 0.1~0.4 范围。结合 HYSPLIT 后向轨迹分析, 寿县本次沙尘污染主要源自我国内蒙古西部、甘肃河西走廊一带沙尘气团的输送。

## 参 考 文 献

- [1] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(4): 513-543.
- [2] McCormick R A, Ludwig J H. Climate modification by atmospheric aerosols[J]. *Science*, 1967, 156(3780): 1358-1359.
- [3] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 52(1/2/3/4): 1-22.
- [4] Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 1. network observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D9): 4262
- [5] 史培军, 严平, 高尚玉, 等. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. *自然灾害学报*, 2000, 9(3): 71-77.  
Shi P J, Yan P, Gao S Y, et al. The duststorm disaster in China and its research progress[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(3): 71-77.
- [6] Han Y X, Fang X M, Zhao T L, et al. Long range trans-pacific transport and deposition of Asian dust aerosols[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4): 424-428.
- [7] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 15-26.  
Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. Analysis on the causes of strong haze pollution in the central and eastern regions of China in January 2013[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2014, 44(1): 15-26.
- [8] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178-1187.  
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [9] Wehner B, Wiedensohler A, Tuch T M, et al. Variability of the aerosol number size distribution in Beijing, China: new particle formation, dust storms, and high continental background[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(22): 1-4.
- [10] Jing J S, Wu Y F, Tao J, et al. Observation and analysis of near-surface atmospheric aerosol optical properties in urban Beijing[J]. *Particuology*, 2015, 18: 144-154.
- [11] Fan X H, Chen H B, Xia X G, et al. Aerosol optical properties from the atmospheric radiation measurement mobile facility at Shouxian, China[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(24): D00K33.
- [12] 丁辉, 牛生杰, 张泽娇. 利用微脉冲激光雷达探测大气混合层高度和气溶胶垂直结构的初步研究[J]. *大气科学学报*, 2015, 38(1): 85-92.  
Ding H, Niu S J, Zhang Z J. Measurements of mixed layer height and aerosol vertical profiles using a micro pulse lidar[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, 38(1): 85-92.
- [13] 陆祖荣, 邱玉珺, 胡方超. 沙尘天气对安徽寿县大气气溶胶光学特性的影响[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(23): 311-316.  
Lu Z R, Qiu Y J, Hu F C. The effects of sand and dust weather to aerosol optical characteristics of Shouxian, China[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(23): 311-316.
- [14] 霍彦峰, 黄勇, 邓学良, 等. 寿县地区气溶胶光学特性研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(12): 50-57.  
Huo Y F, Huang Y, Deng X L, et al. Study on aerosol optical properties in Shouxian region[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(12): 50-57.
- [15] 魏夏璐, 王成刚, 凌新峰, 等. 安徽寿县黑碳气溶胶浓度观测分析研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(11): 3630-3638.  
Wei X L, Wang C G, Ling X F, et al. Observational study of black carbon at Shouxian in Anhui Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(11): 3630-3638.
- [16] 范伟, 陈凯, 凌新峰, 等. 寿县国家气候观测台的冬季大气光学特征[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050101.  
Fan W, Chen K, Ling X F, et al. Atmospheric optical characteristics of national climate observation in Shouxian County in winter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050101.
- [17] 范伟, 邱康俊, 凌新峰, 等. 基于遥感测量的淮河流域中部气溶胶光学和微物理特性分析[J]. *气象*, 2020, 46(4): 528-537.  
Fan W, Qiu K J, Ling X F, et al. Analysis of aerosol optical and microphysical properties in central part of Huaihe River Basin based on remote sensing measurement[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(4): 528-537.
- [18] Xu X Z, Zhao W X, Qian X D, et al. Influence of photochemical aging on light absorption of atmospheric black carbon and aerosol single scattering albedo[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 16829-16844.
- [19] Grimm H, Eatough D J. Aerosol measurement: the use of optical light scattering for the determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, 59(1): 101-107.
- [20] Cheng Y H, Lin Y L. Measurement of particle mass concentrations and size distributions in an underground station[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, 10(1): 22-29.
- [21] Hinds W C. *Aerosol technology properties, behavior, and measurement of airborne particles*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [22] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会. GRIMM 180 测量 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub> 的方法: QX/T 173—2012[S]. 北京: 中国气象局, 2012.  
SAC/TC345. Monitoring method of PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>1</sub> with GRIMM 180: QX/T 173—2012 [S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2012.
- [23] 张霖逸, 颜鹏, 毛节泰, 等. 气溶胶散射相函数的单站观测研究[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(4): 436-446.  
Zhang L Y, Yan P, Mao J T, et al. Observational study on aerosol scattering phase function at Raoyang of Hebei,

- China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(4): 436-446.
- [24] 中国人民解放军总装备部. 前向散射能见度仪通用规范: GJB 6298—2008[S]. 北京: 中华人民共和国中央军事委员会, 2008.
- General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. General specification for forward scatter visibility meter: GJB 6298—2008[S]. Beijing: Central Military Commission, People's Republic of China, 2008.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 沙尘暴天气等级: GB/T 20480—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Grade of sand dust storm weather: GB/T 20480—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 霾的观测识别: GB/T 36542—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Haze identification for meteorological observation: GB/T 36542—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [27] 董德保, 方海涛. 一次低能见度事件中大气颗粒物的微物理特征[J]. *气象科技*, 2015, 43(5): 939-944.
- Dong D B, Fang H T. Microphysic characteristics of atmospheric particles in a low-visibility event[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2015, 43(5): 939-944.
- [28] Whitby K T. The physical characteristics of sulfur aerosols[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1978, 12 (1/2/3): 135-159.
- [29] Hussein T, Dal Maso M, Petäjä T, et al. Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions[J]. *Boreal Environment Research*, 2005, 10 (5): 337-355.
- [30] 鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 海洋大气气溶胶粒子谱分布及其消光特征分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46 (12): 1211002.
- Lu X Y, Li X B, Qin W B, et al. Particle size distribution and extinction characteristic analysis of marine atmospheric aerosol[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1211002.
- [31] Draxler R R. Description of the HYSPLIT\_4 modeling system: NOAA technical memorandum ERL ARL-224 [R]. Silver Spring: Air Resources Laboratory, 2004.
- [32] 杨昊, 谢晨波, 方志远, 等. 星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0110001.
- Yang H, Xie C B, Fang Z Y, et al. Joint observations of vertical distribution of aerosols in Hefei area by spaceborne and ground-based lidars[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0110001.