

杨先逸, 车慧正, 陈权亮, 等. 天空辐射计观测反演北京城区气溶胶光学特性. 应用气象学报, 2020, 31(3): 373-384.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200311

# 天空辐射计观测反演北京城区气溶胶光学特性

杨先逸<sup>1)2)</sup> 车慧正<sup>2)\*</sup> 陈权亮<sup>1)</sup> 梁苑新<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225)

<sup>2)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081)

## 摘 要

利用 2018 年 10 月—2019 年 9 月天空辐射计观测数据反演北京城区气溶胶光学特性参数, 重点分析污染过程中气溶胶光学特性与气象条件的相关性。结果表明: 500 nm 气溶胶光学厚度在 2—7 月较大, 最高值出现在 6 月, 为 0.71。单次散射反照率最高值出现在 8 月, 为 0.96; 最低值出现在 5 月, 为 0.89。440~870 nm Ångström 波长指数最高值出现在夏季, 为 1.11; 最低值出现在春季, 为 0.89。统计发现污染日数仅占总日数的 17%, 其中 62% 为轻度污染; 污染和清洁天气条件下 PM<sub>2.5</sub> 浓度分别为 107.22 μg·m<sup>-3</sup> 和 47.16 μg·m<sup>-3</sup>, 500 nm 气溶胶光学厚度分别为 0.85 和 0.49, 单次散射反照率分别为 0.96 和 0.92; 冬季 Ångström 波长指数在污染天气条件下 (1.02) 大于清洁天气 (0.91), 春季相反。结合天空辐射计、激光雷达和气象数据分析 2019 年 1 月一次污染事件, 可知低风速与高湿度等不利气象条件、气溶胶粒子的吸湿增长和二次转化、污染物局地排放及区域输送共同导致污染事件发生。

**关键词:** 天空辐射计; 气溶胶光学特性; 污染天气; 北京

## 引 言

大气气溶胶可以通过散射和吸收太阳辐射, 影响地球的辐射收支, 进而对气候变化产生影响<sup>[1]</sup>。此外气溶胶粒子还可以作为云凝结核或冰核, 不仅对云形成产生重要影响, 也可以通过改变云结构和光学特性进而影响云滴的大小和云的生命周期, 间接影响气候变化<sup>[2-4]</sup>。研究表明: 大气气溶胶不仅影响全球和区域气候变化, 而且还会造成环境污染, 对人类健康产生不良影响。尽管各国科学家针对气溶胶进行了多年研究, 但气溶胶的浓度变化和光学特性以及显著的时空变化仍是当前全球气候变化评估和预测中不确定性的较大来源之一<sup>[5]</sup>。

地基观测是一种较为有用且准确的测量方法, 虽然地面观测手段在获取气溶胶空间分布方面不占优势, 但其持续稳定观测获得的原始数据和相对成

熟的反演方法使其在气溶胶观测研究中占有重要地位<sup>[6]</sup>。AERONET (Aerosol Robotic Network) 是美国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 在全球范围内建立的太阳光度计观测网络, 采用法国 CIMEL 公司生产的 CE318 型太阳光度计, 基于太阳直接辐射和天空散射辐射反演气溶胶光学特性参数<sup>[7-8]</sup>。CARSNET (China Aerosol Remote Sensing Network) 是中国气象局建立的中国气溶胶地基遥感监测网, 最初用于监测沙尘暴, 经逐步完善后用于分析中国区域大气气溶胶光学特性的分布和变化特征<sup>[9-10]</sup>。PHOTONS (Photométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire) 是法国在欧洲和非洲地区建立的气溶胶光学特性观测网<sup>[11]</sup>。SKYNET (Skyrad Network)<sup>[12]</sup> 采用日本 PREDE 公司生产的 POM 型天空辐射计, 通过测量可见光到近红外波段的太阳直接辐射和天空散射辐射反演一系列气

2020-01-13 收到, 2020-03-15 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41590874, 41825011), 国家重点研究发展计划 (2016YFA0601901), 四川省科技厅应用基础研究项目 (19YYJC)

\* 通信作者, 邮箱: chehz@cma.gov.cn

溶胶特征参数<sup>[13-14]</sup>, 该网络主要位于亚洲和欧洲, 致力于气溶胶-云-辐射相互作用研究。欧洲地区也同样建立了 ESR (European Skynet Radiometer Network) 天空辐射计观测站网用以研究欧洲地区气溶胶光学特性<sup>[15-16]</sup>。

随着经济的飞速发展, 工业化和城市化进程加速, 我国已成为人为气溶胶的主要源地之一, 特别是在人口密集、经济发达的京津冀地区<sup>[17-19]</sup>。大气气溶胶光学特性除了受人口密度和人为因素影响外, 还与沙尘、雾霾等特殊天气条件密切相关<sup>[20]</sup>。车慧正等<sup>[21]</sup>发现北京城区气溶胶粒子体积谱分布具有明显城市气溶胶谱分布特征。孙文文等<sup>[22]</sup>指出北京城区气溶胶主要受到内蒙古地区的沙尘及近海的海盐颗粒物远距离输送的影响, 局地排放的气溶胶颗粒物主要来自机动车尾气和工业排放。杨溯等<sup>[23]</sup>通过分析北京城区气溶胶光学特性变化指出沙尘气溶胶是该地区春季重要的气溶胶类型。夏祥鳌等<sup>[6]</sup>指出除沙尘事件外, 华北地区人为气溶胶排放也是导致该地区大气气溶胶浓度偏大的重要原因。王玲等<sup>[24]</sup>利用 CE318 型太阳光度计观测数据反演北京城区大气气溶胶成分, 发现霾和清洁天气条件下气溶胶成分差异显著。颜鹏等<sup>[25]</sup>发现在京津地区气溶胶光学特性受天气过程影响很大。

本文利用 2018 年 10 月 11 日—2019 年 9 月 30 日 POM-02 型天空辐射计观测数据, 反演北京城区气溶胶光学特性, 对了解实施污染防治后的北京城区气溶胶光学特性变化特征具有重要意义。利用天空辐射计反演结果, 结合气象观测数据以及激光雷达数据多角度分析 2019 年 1 月北京城区一次典型污染事件, 为进一步认识北京城区气溶胶光学特性提供参考。

## 1 数据和方法

### 1.1 观测简介

本文选取 2018 年 10 月 11 日—2019 年 9 月 30 日为观测时段(共 355 d), 观测仪器为日本 PREDE 公司生产的 POM-02 天空辐射计, 架设在北京海淀区中国气象科学研究院楼顶(39.933°N, 116.317°E, 105 m), 该站点位于北京西北三环以内, 为典型城市站点。天空辐射计可以自动观测可见光和近红外波段的太阳直接辐射和散射辐射, 可视化半角度为 1°。根据 Nakajima 等<sup>[13]</sup>反演方法, 5 个通道(400,

500, 670, 870 nm 和 1020 nm)反演得到的气溶胶光学特性包括气溶胶光学厚度  $\tau$ 、单次散射反照率  $\omega$ 、粒子谱分布、Ångström 波长指数  $\alpha$ 。观测期间各月观测样本容量能够满足统计学分析要求。我国的 PM<sub>2.5</sub> 标准值为 24 h 平均浓度小于 75  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 依据此标准将观测期间日平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于 75  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  作为污染天, 分别统计了仪器各月有效观测日数和有效观测次数(有效观测次数为经过质量控制后反演得到的数据量), 以及有效观测中污染天数量和污染天有效观测次数。

### 1.2 数据

中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据来自美国国家航空航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。逐小时颗粒物质量浓度(PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>)数据来自北京市环境保护监测中心(<http://www.bjmemc.com.cn/>)官园站。地面气象观测数据来自国家气象信息中心, 包括风向、风速、温度、降水量、水平能见度和相对湿度等要素。以上数据时段均为 2018 年 10 月—2019 年 9 月。

基于拉曼-米激光雷达观测得到气溶胶消光系数和退偏振比数据, 该仪器位于中国气象局院内, 用于分析 2019 年 1 月 9 日 00:00(北京时, 下同)—14 日 23:00 北京城区气溶胶垂直分布变化。仪器存在 160 m 的探测盲区, 垂直分辨率为 7.50 m, 观测周期为 5 min。

### 1.3 数据可靠性

目前获取气溶胶光学厚度数据主要途径包括地基观测和卫星遥感手段, 其中卫星遥感具有覆盖面广、信息获取方便等特点。毛节奏等<sup>[26]</sup>对比了 2001 年北京城区太阳光度计观测结果和 MODIS 光学产品, 证实了 MODIS 反演气溶胶光学特征的可靠性。许多学者利用 MODIS 卫星反演的气溶胶光学厚度进行研究<sup>[27-30]</sup>。本文选用 Aqua 10 km 气溶胶光学厚度产品与天空辐射计观测得到的气溶胶光学厚度( $\tau_s$ )进行对比, 期望误差采用  $\pm(0.05 + 20\% \tau_s)$  表示。由图 1 可以看到, 卫星反演结果和地基观测结果相比普遍偏高, 约有 52.94% 的匹配点落入期望误差范围以内, 两者相关系数为 0.90(达到 0.01 显著性水平), 均方根误差为 0.17, 具有较好的一致性。卫星气溶胶光学厚度反演算法与植被覆盖密切相关, 而城市地区植被相对较少, 导致反演结果出现偏差。

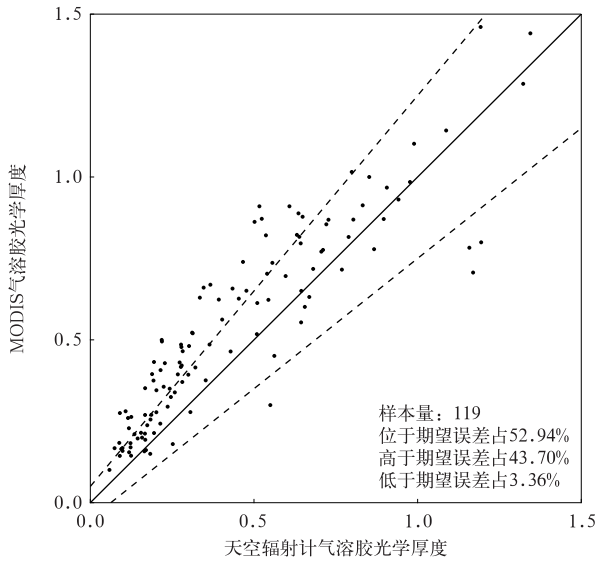


图 1 北京城区(39.933°N,116.317°E,105 m)天空辐射计观测气溶胶光学厚度与 MODIS 卫星反演气溶胶光学厚度对比(实线和虚线分别表示 1:1 线和期望误差分界线)  
 Fig. 1 Comparison of the aerosol optical depth observed by skyradiometer and those of MODIS in Beijing(39.933°N,116.317°E,105 m)(solid and dashed lines denote one-one line and the expected error line, respectively)

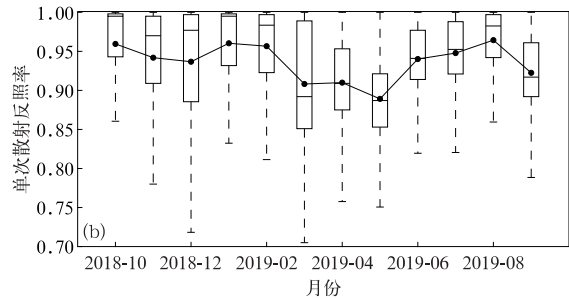
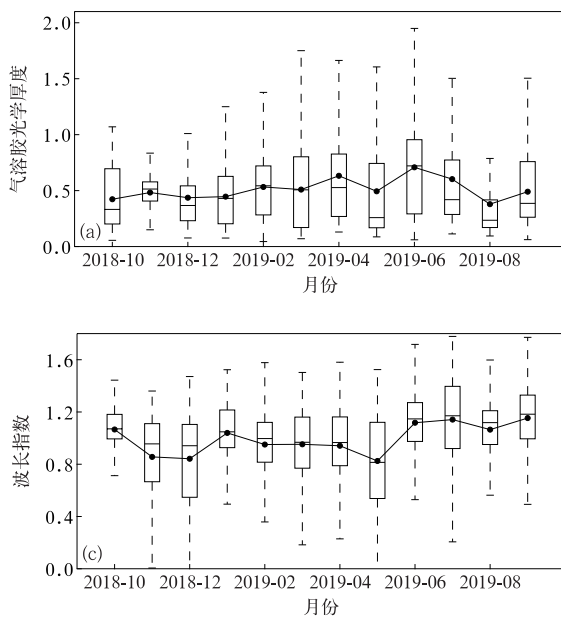
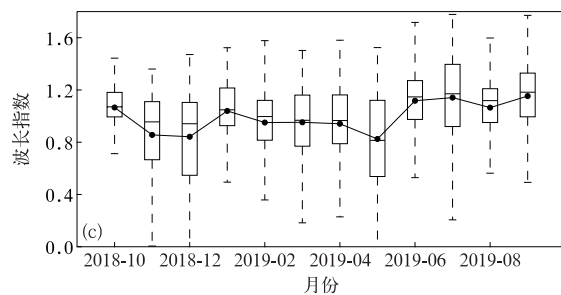


图 2 2018 年 10 月—2019 年 9 月北京城区气溶胶光学特性的逐月变化  
 (a)500 nm 气溶胶光学厚度,(b)500 nm 单次散射反照率,(c)440~870 nm Ångström 波长指数  
 Fig. 2 Monthly averaged variation in aerosol optical properties from skyradiometer measurements in Beijing from Oct 2018 to Sep 2019  
 (a)aerosol optical depth at 500 nm,  
 (b)single scattering albedo at 500 nm,  
 (c)Ångström exponent at 440–870 nm



气溶胶粒子粒径较大,粗粒子占总粒子比例较高,夏季气溶胶粒子粒径较小,细粒子占总粒子比例较高。

由图 3 可以看到,北京城区气溶胶粒子体积谱分布在每个月都呈典型的双峰型分布特征,符合典

## 2 气溶胶光学特性

### 2.1 基于所有观测结果的气溶胶光学特性逐月变化

由图 2a 可以看到,北京城区  $\tau$  在不同季节存在一定差异。 $\tau$  在春季、夏季、秋季、冬季平均值分别为 0.55,0.58,0.47 和 0.49。春夏季  $\tau$  较大,秋冬季  $\tau$  较小,该结果与车慧正等<sup>[21]</sup>、杨溯等<sup>[23]</sup> 研究结论一致。 $\tau$  月平均值 2—7 月较大,其中全年最高值出现在 6 月,为 0.71,其他月份  $\tau$  相对较小,不超过 0.50。本文利用天空辐射计得出北京城区 500 nm  $\omega$  年平均值为 0.93,与车慧正等<sup>[21]</sup> 利用天空辐射计获得的  $\omega$  年平均值 0.92 相差 0.01。同时略高于高中明等<sup>[31]</sup> 利用太阳光度计得到北京城区 440 nm 和 675 nm  $\omega$  年平均值(分别为 0.90 和 0.92)。由图 2b 可以看到,北京城区  $\omega$  平均值 8 月最高,为 0.96;5 月最低,为 0.89。结果表明:北京城区夏季气溶胶粒子散射能力较强,春季较弱。夏季  $\omega$  平均值为 0.95,春季为 0.90。春季空气中具有吸收性的沙尘、浮尘粒子较多,会导致  $\omega$  值偏低<sup>[6,32]</sup>。由图 2c 可以看到, $\alpha$  整体上在夏季(1.11)、秋季(1.09)较高,春季(0.89)、冬季(0.95)较低,说明春季和冬季

型的城市气溶胶分布特征。细模态粒子粒径主要集中在 0.17  $\mu\text{m}$  左右,粗模态粒子粒径主要集中在 3.62~5.29  $\mu\text{m}$ 。整体看,不同月份的气溶胶粒子体积谱分布存在明显差异。4 月粗模态粒子浓度显

著高于其他月份,这可能与沙尘事件影响有关(统计发现2019年4月4—5日有沙尘天气,其他月份没有记录)。细模态粒子浓度在6月最高,说明气溶胶细粒子数目明显增多。细模态粒子粒径在7月主要集中在 $0.25\ \mu\text{m}$ ,说明夏季高温高湿条件容易导致气溶胶粒子吸湿增长。8月细模态和粗模态气溶胶粒子浓度均较小,这可能与降水过程带来的湿清除效应导致大气中气溶胶粒子减小有关。

为进一步探讨不同类型气溶胶粒子的体积谱分布特征,结合 $\omega$ 和 $\alpha$ 对气溶胶粒子进行分类:I类,

细模态强吸收性( $\alpha > 1.2, \omega \leq 0.85$ );II类,混合型强吸收性( $0.6 < \alpha \leq 1.2, \omega \leq 0.85$ );III类,粗模态强吸收性( $\alpha \leq 0.6, \omega \leq 0.85$ );IV类,细模态中度吸收性( $\alpha > 1.2, 0.85 < \omega \leq 0.95$ );V类,混合型中度吸收性( $0.6 < \alpha \leq 1.2, 0.85 < \omega \leq 0.95$ );VI类,粗模态中度吸收性( $\alpha \leq 0.6, 0.85 < \omega \leq 0.95$ );VII类,细模态弱吸收性( $\alpha > 1.2, \omega > 0.95$ );VIII类,混合型弱吸收性( $0.6 < \alpha \leq 1.2, \omega > 0.95$ );IX类,粗模态弱吸收性( $\alpha \leq 0.6, \omega > 0.95$ )。结合图4a、图4b和图4c,可以看到随着粗粒子所占比例的增加,粗模态粒子浓度

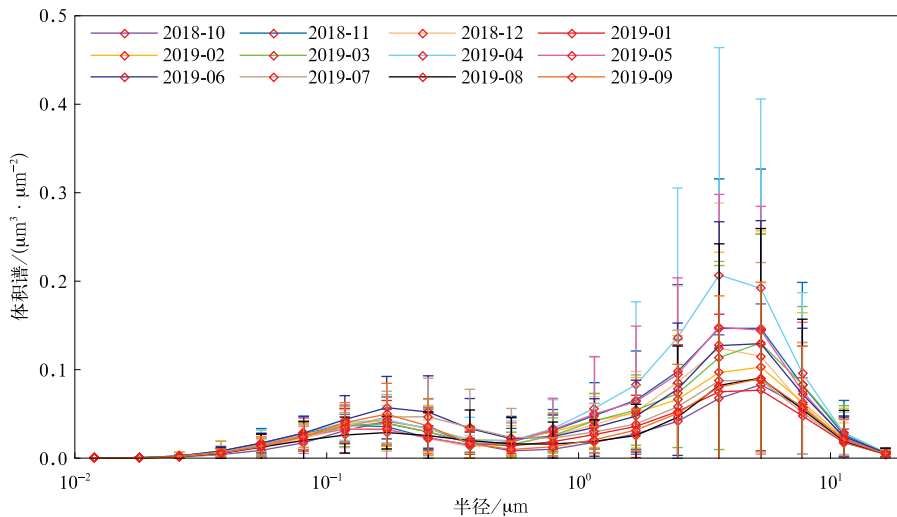


图3 2018年10月—2019年9月北京城区粒子谱分布逐月变化  
Fig. 3 Monthly averaged variation in volume size distribution from skyradiometer measurements in Beijing from Oct 2018 to Sep 2019

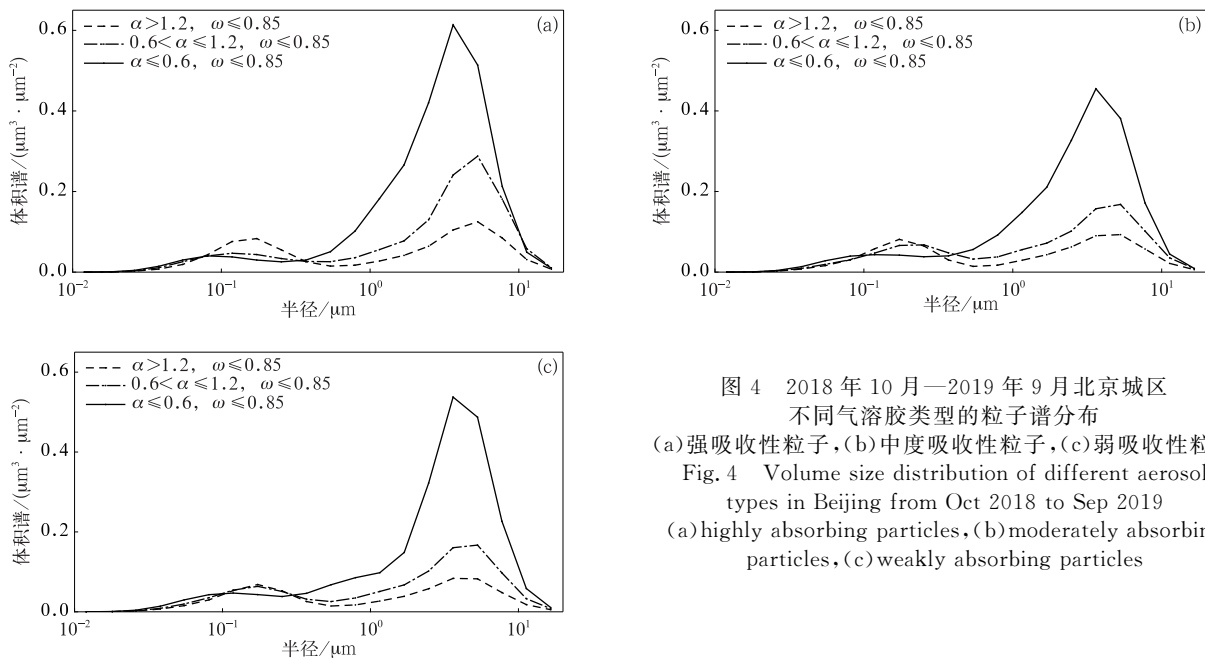


图4 2018年10月—2019年9月北京城区不同气溶胶类型的粒子谱分布  
(a)强吸收性粒子,(b)中度吸收性粒子,(c)弱吸收性粒子  
Fig. 4 Volume size distribution of different aerosol types in Beijing from Oct 2018 to Sep 2019  
(a)highly absorbing particles,(b)moderately absorbing particles,(c)weakly absorbing particles

也明显增大,对应细模态粒子浓度减小。同时,随着气溶胶粒子吸收性减弱,粗、细模态粒子浓度的变化幅度不大。该结果指出粗、细粒子比例会影响粒子体积谱分布,而粒子的吸收散射能力与其体积谱分布没有必然联系。北京城区细粒子占主导的粒子体积谱分布呈典型的双峰型,粗、细模态粒子浓度大小相当;混合型粒子体积谱分布呈双峰型,粗模态粒子浓度大于细模态粒子浓度;粗粒子占主导的粒子体积谱分布呈单峰型,粗模态粒子粒径主要集中在 $3.62\ \mu\text{m}$ 。

## 2.2 污染与清洁天气条件下气溶胶光学特性对比

根据国家 $\text{PM}_{2.5}$ 污染分级标准,统计2018年10

月11日—2019年9月30日各污染等级的实际日数和天空辐射计的有效观测日数。如果出现云层较厚、降水、强沙尘暴等天气现象,无法满足天空辐射计的正常工作要求,导致缺测。由表1可以看到,基于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染分级标准,对比不同 $\text{PM}_{2.5}$ 污染等级下实际日数与仪器观测日数的数目,发现天空辐射计在轻度、中度污染等级具有较好的观测能力。2018年10月—2019年9月北京城区空气质量总体表现良好,实际日数中空气质量为优的日数占总日数的48%,非污染日数比例超过83%,污染级别主要集中于轻度污染等级,轻度污染日数占总污染日数的62%,但距离世界卫生组织 $\text{PM}_{2.5}$ 标准值还存在差距。

表1 2018年10月11日—2019年9月30日空气质量等级统计

Table 1 Air quality rank statistics from 11 Oct 2018 to 30 Sep 2019

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	空气质量等级	实际日数/d	仪器有效观测日数/d
(0,35]	优	171	135
(35,75]	良	123	103
(75,115]	轻度污染	38	24
(115,150]	中度污染	12	8
(150,250]	重度污染	11	2
(250,500]	严重污染	0	0

在污染天气和清洁天气条件下,2018年10月11日—2019年9月30日 $\tau$ 平均值分别为0.85和0.49,即污染天气条件下气溶胶粒子对光的削减能力强; $\omega$ 平均值分别为0.96和0.92,即污染天气条件下气溶胶粒子的散射能力较强,污染天气条件下 $\omega$ 月平均最高值出现在1月,清洁天气条件下 $\omega$ 月平均最低值出现在3月; $\alpha$ 平均值分别为0.97和1.01,冬季污染天气和清洁天气条件下, $\alpha$ 分别为1.02和0.91,春季污染天气和清洁天气条件下, $\alpha$ 分别为0.87和0.90。上述分析表明:在污染天气条件下,冬季北京城区以细粒子为主,春季以粗粒子为主,其原因主要是该地区冬季污染天气类型以霾为主,而春季主要为沙尘所导致; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值分别为 $107.22\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $47.16\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,污染天气条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度月平均最高值出现在1月,为 $146.53\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

## 2.3 2019年1月北京重污染过程气溶胶光学特性

根据2.2节分析可知,北京城区冬季污染天气条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大,污染最为严重,很多学者也针对北京城区冬季污染事件进行了研究<sup>[33-34]</sup>。本文将研究2019年1月北京城区冬季大气污染状况。由图5可以看到,大气污染状况越严重, $\tau$ 越大,

$\text{PM}_{2.5}$ 在空气中含量越高。有效观测日的 $\tau$ 日平均值与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化趋势大体一致。根据国家 $\text{PM}_{2.5}$ 超标分级标准发现2019年1月10—14日北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续处于高值期,最高日平均值达 $227.00\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\tau$ 均高于0.40,选取2019年1月8—15日(图5阴影部分)的一次完整污染事件进行分析。

图6a为2019年1月8—15日北京大气颗粒物浓度逐小时变化, $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 浓度变化趋势基本相同。在污染天气条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 浓度大小较为接近,说明气溶胶粒子中 $\text{PM}_{2.5}$ 占绝大部分,细粒子为主要大气污染物。11日和12日晚,颗粒物浓度出现爆发性增长,2019年1月12日21:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高达 $589\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,次日凌晨出现降低趋势。由图6b可见,能见度与相对湿度变化趋势相反,相对湿度是能见度的主要影响因子之一<sup>[35]</sup>。污染天气下相对湿度可达90%,对应1月9—14日能见度日平均值较低。1月13日04:00能见度最低达到0.10 km,此时相对湿度较大,温度偏低,有利于雾的形成,导致能见度进一步降低。根据地表风场数据可知,1月11日风速小于 $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,污染物累积不易扩散,颗粒物浓度增大,污染事件加重。

13日风速增大,扩散条件得到改善,污染事件有所好转。14—15日地面风速较大,有利于污染物扩

散,污染事件结束。

表2为2019年1月8—15日北京城区不同波

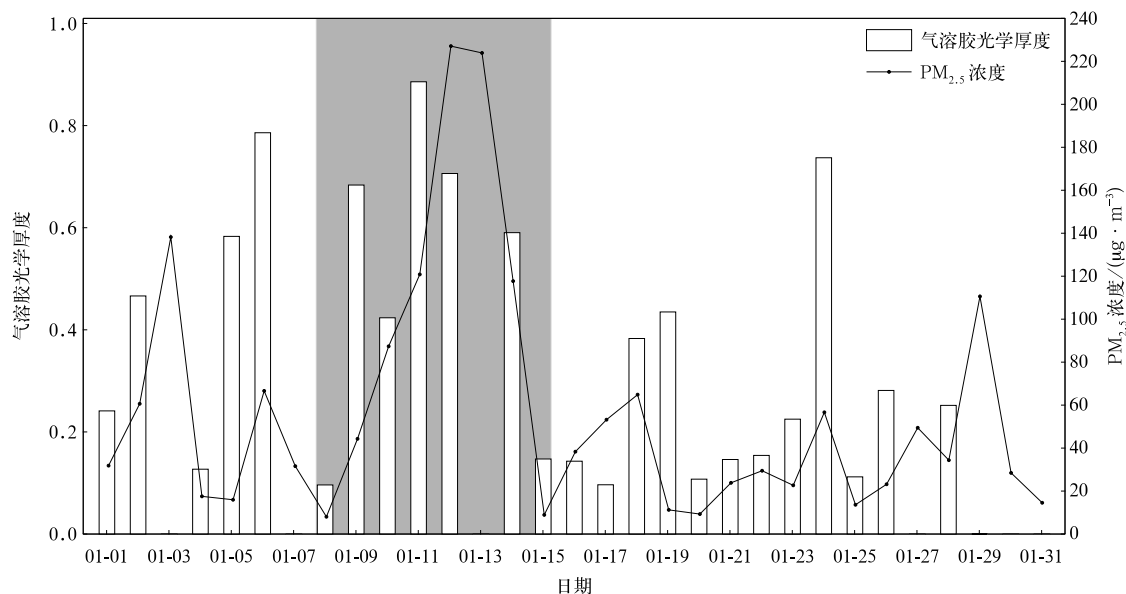


图5 2019年1月北京城区500 nm气溶胶光学厚度和PM<sub>2.5</sub>浓度日平均值变化  
(阴影部分代表污染事件)

Fig. 5 Daily averaged aerosol optical depth at 500 nm and PM<sub>2.5</sub> in Beijing from 1 Jan to 31 Jan in 2019 (the shaded denotes pollution period)

段 $\tau$ 日平均值,以500 nm为例分析污染事件中 $\tau$ 变化。由表2可以看到, $\tau$ 随波长的增大而减小,表明气溶胶粒子的消光性具有波长选择性。1月8日 $\tau$ 为0.10,天气状况良好,而9日 $\tau$ 上升到0.68,表明北京城区整体大气消光性开始增加,污染事件开始。10日 $\tau$ 有所下降,又迅速上升至11日的0.89,近地面风速较小,污染物不易扩散导致污染加重。12日北京城区污染持续, $\tau$ 高达0.71,相对湿度接近90%。由图6a可知,1月12日18:00—13日07:00 PM<sub>2.5</sub>浓度均大于 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,是整个污染事件中最严重的时段。13日10:00—17:00,PM<sub>2.5</sub>浓度迅速下降至 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,受西北冷空气的渗透,扩散条件改善。14日由于相对湿度较大,导致气溶胶吸湿增长,消光能力增强, $\tau$ 增加至0.59。15日扩散条件增强, $\tau$ 低至0.15,污染事件结束。

表3为2019年1月8—15日北京城区不同波段 $\omega$ 的日平均值,以500 nm为例分析污染事件中 $\omega$ 变化。1月8—10日 $\omega$ 呈上升趋势,由0.93上升至0.99,表明气溶胶粒子散射能力增强。1月11日 $\omega$ 下降至0.98,是由于当日扩散条件极差,吸收性气

溶胶(如黑碳气溶胶)累积所致。1月12日 $\omega$ 上升至0.99,是由于相对湿度偏高,气溶胶粒子吸湿增长使得半径增大,散射能力增强。1月14日 $\omega$ 较高值同样也受到气溶胶粒子吸湿增长影响。1月15日 $\omega$ 下降至0.84,表明大气中具有强吸收能力的气溶胶粒子增加。

图7为2019年1月8—15日细、粗粒子占比的变化情况,表示 $\alpha$ 及细粒子与粗粒子的比例 $\gamma$ (PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>浓度之比)随时间的变化趋势。1月8—13日 $\gamma$ 从0.37上升至0.92,处于平稳上升阶段,表明近地面气溶胶细粒子逐渐增多。1月13—15日 $\gamma$ 迅速下降,15日 $\gamma$ 低至0.17。污染期间 $\alpha$ 处于波动变化趋势,1月9日 $\alpha$ 降低至0.82,粗粒子数量增多。1月10日 $\alpha$ 增加至1.09,说明此时大气中细粒子比例增加。1月11日 $\alpha$ 为0.91,是由于低风速产生的不利扩散条件导致气溶胶粒子累积,使粗粒子数量也同时增加。1月12日 $\alpha$ 为1.16,此时相对湿度迅速升高,细粒子开始吸湿增长,从污染累积阶段逐渐进入污染爆发阶段。1月14—15日 $\alpha$ 由1.00减小至0.45,该时期气溶胶细粒子占比显著降低,粗粒子占比较大。

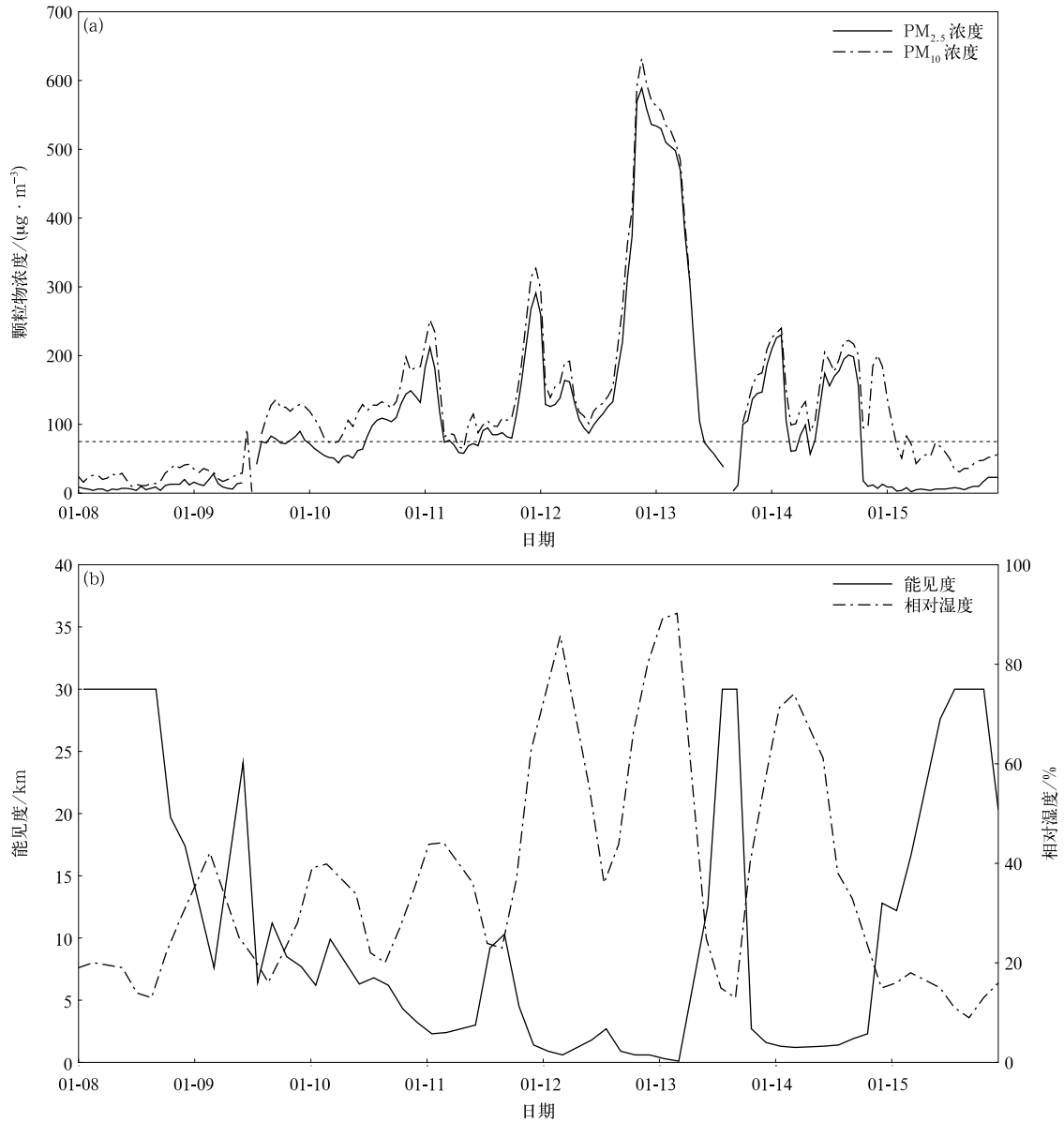


图6 2019年1月8—15日颗粒物浓度和气象要素变化  
(a) $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{10}$ 浓度变化,(b)能见度与相对湿度变化

Fig. 6 Temporal variation of particulate concentration and meteorological elements from 8 Jan to 15 Jan in 2019  
(a) $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$ , (b)visibility and relative humidity

表2 2019年1月8—15日气溶胶光学厚度统计

Table 2 Statistics of aerosol optical depth from 8 Jan to 15 Jan in 2019

日期	波段				
	400 nm	500 nm	670 nm	870 nm	1020 nm
01-08	0.12	0.10	0.07	0.06	0.05
01-09	0.85	0.68	0.55	0.45	0.40
01-10	0.58	0.42	0.31	0.24	0.21
01-11	1.13	0.89	0.70	0.57	0.51
01-12	0.95	0.71	0.50	0.38	0.33
01-13					
01-14	0.77	0.59	0.44	0.35	0.30
01-15	0.16	0.15	0.13	0.12	0.11

表3 2019年1月8—15日单次散射反照率统计

Table 3 Statistics of single scattering albedo from 8 Jan to 15 Jan in 2019

日期	波段				
	400 nm	500 nm	670 nm	870 nm	1020 nm
01-08	0.90	0.93	0.87	0.82	0.80
01-09	0.93	0.96	0.96	0.97	0.95
01-10	0.94	0.99	0.99	0.97	0.91
01-11	0.92	0.98	0.96	0.95	0.92
01-12	0.93	0.99	0.99	0.97	0.92
01-13					
01-14	0.91	0.99	0.99	0.99	0.94
01-15	0.83	0.84	0.82	0.84	0.84

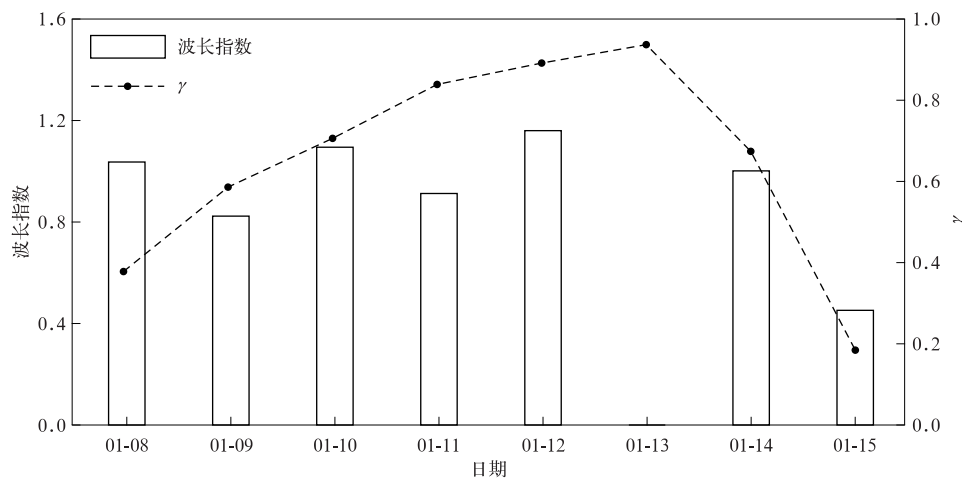


图7 2019年1月8—15日北京城区 Ångström 波长指数逐日变化

Fig. 7 Daily averaged variation of Ångström exponent from skyradiometer in Beijing from 8 Jan to 15 Jan in 2019

由图8可以看到,1月8日气溶胶粒子体积浓度都非常低。1月9日污染天气条件下,体积谱呈双峰分布,其中粗模态粒子体积浓度大约是细模态粒子体积浓度的4倍。1月10日仍为双峰分布,但粗、细模态粒子体积浓度相当,细模态气溶胶粒子半径主要集中在 $0.17\ \mu\text{m}$ ,粗模态粒子半径主要集中在 $3.62\ \mu\text{m}$ 。1月11日为双峰分布,而粗模态粒子体积浓度爆发性增长到 $0.23\ \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ ,细模态粒子体积浓度也增长到 $0.07\ \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ ,这是由于污染累积阶段不利的扩散条件导致。1月12日呈三峰型分布特征,其中粒子半径主要集中在 $0.17\ \mu\text{m}$ 、 $1.69\ \mu\text{m}$ 和 $5.29\ \mu\text{m}$ 。该结果表明在高相对湿度的条件下,气溶胶粒子易吸湿增长,使得半径逐渐增大。1月14日呈双峰分布特征,吸湿增长同样导致气溶胶粒子半径增大,细模态粒子半径主要集中在 $0.17\sim 0.25\ \mu\text{m}$ ,粗模态粒子半径主要集中在 $5.29\ \mu\text{m}$ 。1月15日呈单峰型分布,细模态粒子占比非常少,粗模态粒子半径集中在 $5.29\ \mu\text{m}$ 左右,

峰值半径对应的体积浓度高达 $0.15\ \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 。该结论表明:1月15日气溶胶粗粒子和细粒子比例严重失调,与1月15日 $\alpha$ 异常偏小相对应。

图9为2019年1月9—14日一次典型北京冬季污染事件过程中基于激光雷达观测得到的 $532\ \text{nm}$ 气溶胶消光系数及退偏振比分布,可以看到,1月9日00:00在 $0.5\ \text{km}$ 高度附近出现气溶胶消光层,消光系数增大,粒子退偏振比也有所增加。11:00在 $1.5\ \text{km}$ 高度以下消光系数大于 $0.40\ \text{km}^{-1}$ ,退偏振比为 $0.05\sim 0.10$ ;在 $3.5\sim 5.0\ \text{km}$ 高度消光系数大于 $0.75\ \text{km}^{-1}$ ,退偏振比小于 $0.10$ ,可能是云层的影响。1月9日18:00—10日04:00, $1.5\sim 3.0\ \text{km}$ 高度消光系数变化范围为 $0.30\sim 0.90\ \text{km}^{-1}$ ,退偏振比小于 $0.10$ ,该区域可能为云和气溶胶共存。此后,气溶胶消光层高度出现下降并扩散,消光系数高值区(大于 $0.60\ \text{km}^{-1}$ )呈带状紧贴近地面,近地面污染事件发生。1月11日00:00在 $2.5\ \text{km}$ 高度以上区域的消光系数大于 $0.45\ \text{km}^{-1}$ ,退偏振比大于 $0.25$ ,可能是



不规则冰晶粒子组成的冰云影响。1月11日消光系数逐渐增大,达 $0.99 \text{ km}^{-1}$ 以上,退偏振比无明显变化,气溶胶粒子浓度不断增大,处于污染物累积阶段。1月11日19:00气溶胶消光层开始降低,近地面消光系数可达 $0.90 \text{ km}^{-1}$ 以上,气溶胶粒子浓度显著增加,进入污染爆发阶段。1月12日气溶胶消光

系数维持在高值范围,退偏振比稳定在1.0 km以内。直到1月13日凌晨,消光系数迅速减小。在1月13日10:00在0.5 km高度附近出现气溶胶消光带(退偏振比大于0.20,消光系数小于 $0.30 \text{ km}^{-1}$ ),由于近地面风速较大导致地面扬尘。1月13日18:00消光系数在0.5 km高度附近迅速增大至 $0.90 \text{ km}^{-1}$ 以

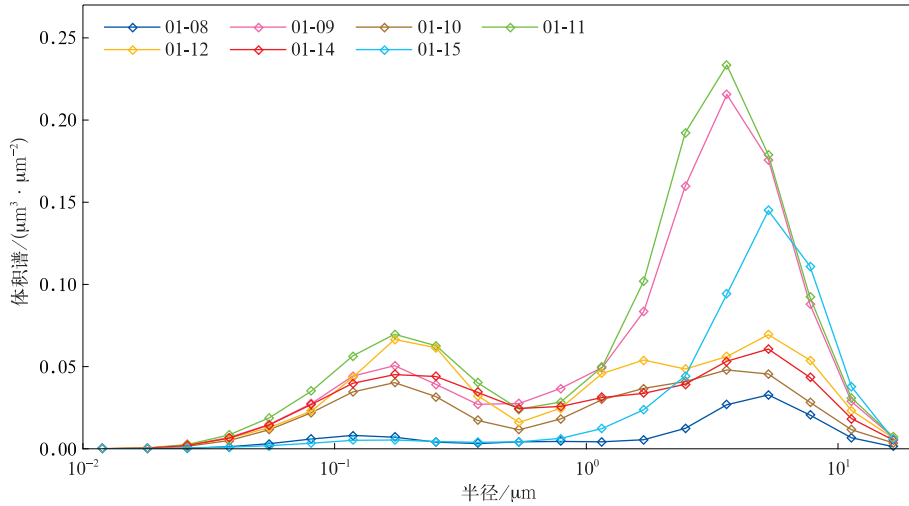


图 8 2019年1月8—15日北京城区粒子谱分布变化  
Fig. 8 Averaged volume size from skyradiometer in Beijing from 8 Jan to 15 Jan in 2019

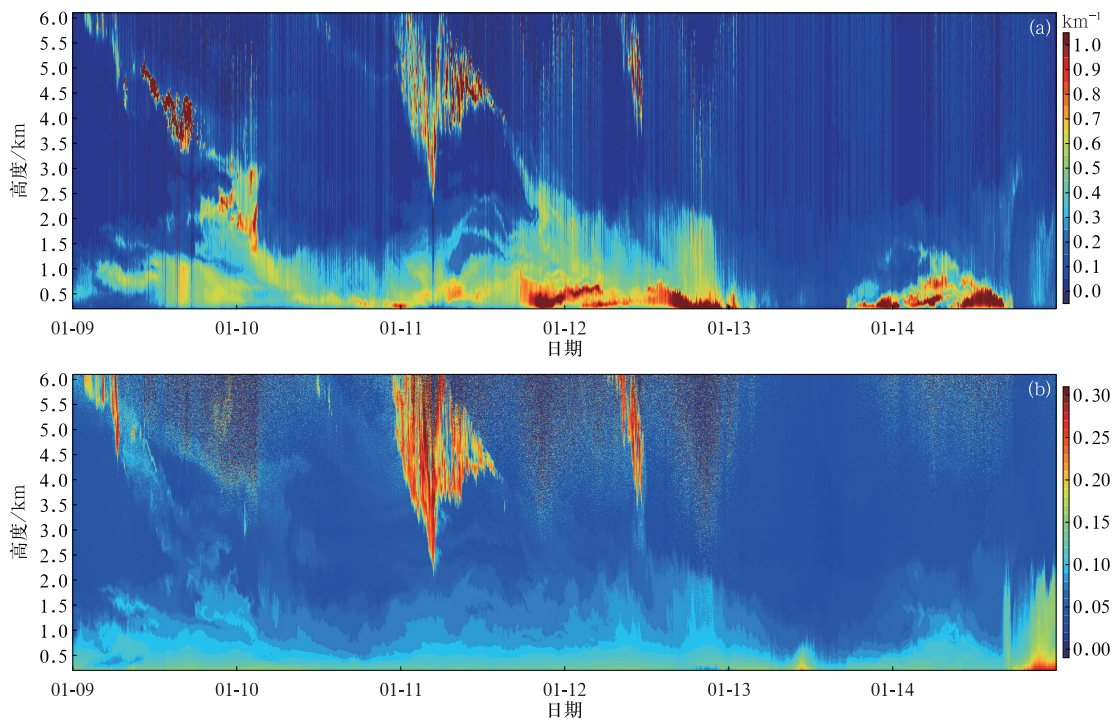


图 9 2019年1月9—14日北京城区532 nm气溶胶消光系数(a)和退偏振比(b)分布  
Fig. 9 Temporal and spatial distribution of extinction coefficient(a) and the depolarization ratio(b) at 532 nm in Beijing from 9 Jan to 14 Jan in 2019

上,退偏振比小于 0.10,说明北京城区再次受到气溶胶污染。1月14日19:00受到强西北风的影响,风速增大有利于污染物扩散,消光系数迅速减小,另外西北风有利于将西北地区的沙尘粒子输送到北京,造成非球形粒子增多,因此,在1.5 km高度处退偏振比明显增加。

### 3 结 论

通过2018年10月—2019年9月天空辐射计连续观测数据,反演得到北京城区气溶胶光学特性参数包括 $\tau$ 、 $\omega$ 、 $\alpha$ 和粒子谱分布特征,结合激光雷达重点分析了2019年1月一次典型污染事件过程中气溶胶光学特性变化及其与气象条件的相互联系。分析结果表明:

1) 北京城区气溶胶光学厚度春夏季较大,秋冬季较小;夏季气溶胶散射能力强,春季较弱;春冬季粗粒子较多,夏季细粒子较多。气溶胶粒子体积谱呈双峰型分布,粗、细粒子比会影响体积谱分布,而粒子的吸收、散射能力对体积谱分布影响不显著。

2) 污染天气条件下 $PM_{2.5}$ 浓度是清洁天气下 $PM_{2.5}$ 浓度平均值的2.27倍;污染天气和清洁天气条件下气溶胶光学厚度平均值分别为0.85和0.49;气溶胶粒子在污染天气下具有更强的散射能力。受冬季霾污染和春季沙尘事件影响,冬季污染天气条件下细粒子更多,春季污染天气条件下粗粒子更多。

3) 分析2019年1月8—15日一次典型污染事件,低风速、高湿度等不利气象条件、气溶胶吸湿增长和二次转化、污染物局地排放及区域输送共同导致严重污染事件的发生。

### 参 考 文 献

- [1] Ackerman T P, Toon O B. Absorption of visible radiation in atmosphere containing mixtures of absorbing and nonabsorbing particles. *Appl Opt*, 1981, 20(20): 3661-3667.
- [2] Twomey S, Piepgrass M, Wolfe T L, et al. An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus*, 2010, 36(5): 356-366.
- [3] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *J Geophys Res Atmos*, 1997, 102(D6): 6831-6864.
- [4] Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(18): 9875-9880.
- [5] Houghton J T, Ding Y, Griggs D I, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2001// The Scientific Basis. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [6] 夏祥鳌, 王普才, 陈洪滨, 等. 中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究. *遥感学报*, 2005, 9(4): 429-437.
- [7] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens Environ*, 1998, 66(1): 1-16.
- [8] Holben B N, Tanré D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *J Geophys Res Atmos*, 2001, 106(D11): 12067-12097.
- [9] Che H, Yang Z, Zhang X, et al. Study on the aerosol optical properties and their relationship with aerosol chemical compositions over three regional background stations in China. *Atmos Environ*, 2009, 43(5): 1093-1099.
- [10] 张晓春, 车慧正, 魏垚. CE-318型太阳光度计常见问题及其解决方法. *气象科技*, 2010, 38(1): 102-106.
- [11] Prats N, Cachorro V E, Sorribas M, et al. Columnar aerosol optical properties during “El Arenosillo 2004 Summer Campaign”. *Atmos Environ*, 2008, 42(11): 2643-2653.
- [12] Nakajima T, Yoon S C, Ramanathan V, et al. Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. *J Geophys Res*, 2007, 112(24): 1-23.
- [13] Nakajima T, Tonna G, Rao R, et al. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *Appl Opt*, 1996, 35(15): 2672-2686.
- [14] Hashimoto M, Nakajima T, Dubovik O, et al. Development of a new data-processing method for SKYNET sky radiometer observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(11): 2723-2737.
- [15] Campanelli M, Estelles V, Smyth T, et al. Monitoring of Eyjafjallajökull volcanic aerosol by the new European Skynet Radiometers (ESR) network. *Atmos Environ*, 2012, 48(2): 33-45.
- [16] Estellés V, Campanelli M, Smyth T, et al. Evaluation of the new ESR network software for the retrieval of direct sun products from CIMEL CE318 and PREDE POM01 sun-sky radiometers. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12(23): 11619-11630.
- [17] Xu X, Xie L, Ding G, et al. Beijing air pollution project to benefit 2008 Olympic Games. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(11): 1543-1544.
- [18] Li Z, Li C, Chen H, et al. East Asian studies of tropospheric aerosols and their impact on regional climate (EAST-AIRC): An overview. *J Geophys Res*, 2011, 116(4): 220-237.
- [19] Ding A J, Wang T, Thouret V, et al. Tropospheric ozone climatology over Beijing: Analysis of aircraft data from the MOZAIC program. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(1): 1-13.
- [20] Che H Z. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961—2000. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(6): 2341-2352.
- [21] 车慧正, 石广玉, 张小曳. 北京城区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究. *中国科学院大学学报*, 2007, 24(5): 699-704.

- [22] 孙文文. 北京城区大气气溶胶光学特性与区域雾霾事件分析. 环境污染与防治, 2016, 38(2): 1-6.
- [23] 杨溯, 石广玉, 段云霞, 等. 天空辐射计观测 2006 年春季北京城区气溶胶光学特性的研究. 气候与环境研究, 2012, 17(1): 20-28.
- [24] 王玲, 李正强, 李东辉, 等. 利用太阳-天空辐射计遥感观测反演北京冬季灰霾气溶胶成分含量. 遥感学报, 2013, 17(4): 944-958.
- [25] 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性. 应用气象学报, 2010, 21(3): 257-265.
- [26] 毛节泰, 刘晓阳, 李成才, 等. MODIS 卫星遥感北京城区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. 应用气象学报, 2002, 13(增刊 D): 127-135.
- [27] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用 MODIS 遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征. 应用气象学报, 2003, 14(1): 1-7.
- [28] 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染. 应用气象学报, 2004, 15(6): 641-650.
- [29] 田华, 马建中, 李维亮, 等. 中国中东部地区硫酸盐气溶胶直接辐射强迫及气候效应的数值模拟. 应用气象学报, 2005, 16(3): 322-333.
- [30] 程兴宏, 徐祥德, 陈尊裕, 等. 北京地区  $PM_{10}$  浓度空间分布特征的综合变分分析. 应用气象学报, 2007, 18(2): 165-172.
- [31] 高中明, 闭建荣, 黄建平. 基于 AERONET 和 SKYNET 网观测的中国北方地区气溶胶光学特征分析. 高原气象, 2013, 32(5): 1293-1307.
- [32] Che H Z, Qi B, Zhao H J, et al. Aerosol optical properties and direct radiative forcing based on measurements from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) in eastern China. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18(1): 405-425.
- [33] 王晓云, 潘莉卿, 吕伟林, 等. 北京城区冬季空气污染物垂直分布与气象状况的观测分析. 应用气象学报, 2001, 12(3): 279-286.
- [34] 贾小芳, 颜鹏, 孟昭阳, 等. 2016 年 11—12 月北京及周边重污染过程  $PM_{2.5}$  特征. 应用气象学报, 2019, 30(3): 302-315.
- [35] 姜江, 张国平, 高金兵. 北京大气能见度的主要影响因子. 应用气象学报, 2018, 29(2): 188-199.

## Retrieval of Aerosol Optical Properties by Skyradiometer over Urban Beijing

Yang Xianyi<sup>1)2)</sup> Che Huizheng<sup>2)</sup> Chen Quanliang<sup>1)</sup> Liang Yuanxin<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

<sup>2)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather (LASW), CMA Key Laboratory for Atmospheric Chemistry, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Aerosol particles can scatter and absorb solar radiation and affect microphysical processes of clouds to change the earth's radiation budget. It is reported that aerosol particles not only have an impact on climate change, but also cause polluted environment and affect human health. Ground-based measurement networks such as AERONET and SKYNET are very useful and accurate ways to monitor the spatio-temporal distribution of aerosols using the sun-sky radiometric technique. Aerosol optical properties retrieved by a PREDE skyradiometer are used to analyze the variation of aerosol in Beijing from October 2018 to September 2019. Results show that aerosol optical depth at 500 nm is high from February to July, the highest value is 0.71 in June, the highest single scattering albedo is 0.96 in August and the lowest value is 0.89 in May, Ångström exponent in summer (1.11) is higher than that in spring (0.89), and the volume size distribution pattern shows typical bimodal in every month. According to the Chinese National Secondary Standards for PM<sub>2.5</sub>, pollution days are picked. It is found that pollution days only account for 17%, of which 62% are light pollution days. The statistical result of air quality in Beijing is good from October 2018 to September 2019. Aerosol optical properties and PM<sub>2.5</sub> under pollution and clean weather conditions in Beijing are discussed. The value of PM<sub>2.5</sub> under pollution weather condition is 2.27 times larger than that under clean weather condition, values of aerosol optical depth at 500 nm are 0.85 and 0.49 under pollution and clean weather conditions, respectively. Values of single scattering albedo are 0.96 and 0.92 under pollution and clean weather conditions, respectively. The value of Ångström exponent under pollution weather condition (1.02) is larger than that under clean weather condition (0.91) in winter while the value of Ångström exponent under pollution weather condition (0.87) is smaller than that under clean weather condition (0.90) in spring. Skyradiometer retrieved data, combined with lidar measurement and meteorological data are used to analyze a serious pollution event in winter over Beijing. The result suggests that poor meteorological conditions (low wind speed and high relative humidity), the hygroscopic growth of aerosol, aerosol secondary transformation, local emissions and regional transportation lead to this serious pollution event.

**Key words:** skyradiometer; aerosol optical properties; pollution weather condition; Beijing