

吴炜,丛春华,郑怡. 山东气溶胶光学厚度时空分布及其与地面大气污染物质量浓度的相关性分析[J].海洋气象学报, 2021,41(1):58-67.

WU Wei, CONG Chunhua, ZHENG Yi. Study on spatial and temporal distribution of AOT and its correlation with mass concentrations of ground-level atmospheric pollutants in Shandong [J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41 (1): 58 - 67. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.01.006. (in Chinese)

## 山东气溶胶光学厚度时空分布及其与地面 大气污染物质量浓度的相关性分析

吴炜<sup>1</sup>,丛春华<sup>2</sup>,郑怡<sup>2</sup>

(1.山东省气象科学研究所,山东 济南 250031; 2.山东省气象台,山东 济南 250031)

**摘要:** 基于卫星的气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness, AOT)是研究大气污染程度及时空变化的重要参考,由于大气污染物排放特征、地理和气候背景不同,不同区域 AOT 的时空分布及其与地面大气污染物质量浓度的相关性存在一定的差异。选取了2017年7月—2020年7月山东89个国家环境空气质量监测站数据、日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)发布的葵花8号和9号气象卫星(Himawari-8/9) AOT产品、欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的ERA5再分析数据产品,研究了山东地区卫星 AOT 时空分布特征, AOT 与地面污染物质量浓度的相关性,并得出了以下结论: 1) 山东存在两个主要的 AOT 低值区,分别位于鲁中山区一带,半岛丘陵并延伸到东部沿海一带,低值区的分布没有明显的季节变化;山东 AOT 年平均的高值区主要分布在山东西部、南部与外省接壤附近地区,以及渤海南部至莱州湾沿岸一带,在分析气溶胶跨省传输时值得关注。不同季节 AOT 的高值区分布存在差异。2) 山东 AOT 白天变化呈现双峰结构,08时由峰值逐渐下降,11时转为上升,14时达全天最大值0.608; AOT 的日变化趋势与细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、O<sub>3</sub>等大气污染物质量浓度变化明显不同,是影响其相关性的重要因素。AOT 月际变化中,存在两个显著的峰值6月(0.648)和10月(0.622),2月 AOT 最低。AOT 的季节变化与地面污染物质量浓度的季节变化呈现一定的反位相特征。3) 总体上 AOT 与 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>等主要大气污染物质量浓度的相关性不高,一年之中,6月 AOT 与污染物的相关程度最低,1月的相关性最高;15—17时是 AOT 与污染物相关性最强的时间段,而10时相关性最差。单凭 AOT 难以定量反映污染物的分布特征,使用卫星开展地面大气污染监测分析还需纳入更多的因子进行分析。

**关键词:** 葵花气象卫星;气溶胶光学厚度;时空分布;大气污染物;相关性分析;质量浓度;细颗粒物;臭氧

中图分类号: X51;P404 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2021)01-0058-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.01.006

收稿日期:2020-11-11;修订日期:2021-01-12

基金项目:山东省重点研发计划项目(2016GSF117025);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202007);华东区域气象科技协同创新基金合作项目(基于葵花-8卫星的陆地气溶胶光学厚度反演研究);山东省气象科学研究所数值天气预报应用技术开放研究基金项目(SDQXKF2014Z06)

第一作者:吴炜,男,博士,正高级工程师,主要从事数值预报、环境气象、海洋气象研究,wuwe\_i\_sd@163.com。

通信作者:丛春华,女,博士,正高级工程师,主要从事台风和环境气象研究,cch513@163.com。

## Study on spatial and temporal distribution of AOT and its correlation with mass concentrations of ground-level atmospheric pollutants in Shandong

WU Wei<sup>1</sup>, CONG Chunhua<sup>2</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>

(1. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

**Abstract** The satellite-based aerosol optical thickness (AOT) is a major reference for studying air pollution and its spatial and temporal variations. As a result of distinct air pollutant emission, geography, and climate background, the spatial and temporal distribution of AOT and its correlations with mass concentrations of ground-level pollutants are different in different areas. In this study, selected data of 89 national environment monitoring stations in Shandong from July 2017 to July 2020, Himawari-8/9 AOT products issued by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), and ERA5 reanalysis data issued by European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) are analyzed to explore the spatial and temporal distribution of AOT in Shandong and its correlations with mass concentrations of ground-level pollutants. The results are shown below. 1) There are two major low AOT areas in Shandong, distributed around the mountainous areas of central Shandong and Jiaodong Peninsula with an extension to the east coast, and the distribution of low AOT areas presents few seasonal variations; high AOT in Shandong mainly covers areas in the west and south of Shandong which are in conjunction with other provinces and areas from southern Bohai to the coast of Laizhou Bay, which is noteworthy when analyzing the interprovincial transport of aerosol. The distribution of high AOT areas is different in different seasons. 2) The diurnal variation of AOT in Shandong, which declines from the peak at 08:00, goes up at 11:00, and reaches its daily maximum (0.608) at 14:00, has a bimodal distribution; the diurnal variation of AOT is quite different with that of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and O<sub>3</sub>, which is an important factor affecting the correlations. For monthly distribution, there are two peak values obtained in July (0.648) and October (0.622), while AOT in February has the minimum value. There is to some extent contradictory seasonality between AOT and mass concentrations of ground-level pollutants. 3) In general, the correlations between AOT and mass concentrations of ground-level pollutants, such as PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub>, are weak, while June sees the lowest and January the highest correlation coefficient values. AOT has the highest correlation with mass concentrations of pollutants between 15:00 and 17:00 and the lowest correlation coefficient at 10:00. This research shows it is difficult to quantitatively reflect the distribution of ground-level pollutants only based on AOT, and more factors need to be considered in monitoring and analyzing ground-level pollutions via satellite remote sensing.

**Key words** Himawari weather satellite; aerosol optical thickness; spatial and temporal distribution; atmospheric pollutant; correlation analysis; mass concentration; fine particulate matter; O<sub>3</sub>

### 引言

山东属于京津冀周边污染较重的省份。随着《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的实施,山东空气质量整体延续了改善势头,但 2019 年改善幅度明显减小,部分城市出现反弹<sup>[1]</sup>。加强污染监测和分析对于区域污染机制研究和治理具有重要意义。环

境空气质量监测主要通过地面监测站直接获得近地面污染物质量浓度。另外,由于大气污染物主要以气溶胶的形式存在,气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness, AOT)是表征大气浑浊度的重要物理量之一,因此还可以通过气溶胶光学厚度间接探测污染的程度。地面监测站网主要包括:国家环境空气质量监测网、全球 AOT 自动观测网(Aerosol

Robotic Network, AERONET)、中国气象局建立的中国气溶胶地基遥感监测网(China Aerosol Remote Sensing Network, CARSNET)等。虽然地面站能对污染物进行连续观测,但站点稀疏,成本高昂。目前,空气质量监测主要集中在城市,而广大的农村,以及人口稀少的区域,缺乏空气质量监测,因而无法得到空气质量的整体空间分布状况,难以反映污染物时空分布、污染源及传输特性等,制约了相关研究和分析。卫星遥感能弥补上述不足,能够快速方便地获取大范围空间连续的气溶胶信息,为大气环境的监测提供了一条快捷的途径。MA and YU<sup>[2]</sup>借助数值模式和多种观测平台分析了全球 AOT 的季节和空间分布特征。目前卫星遥感多采用 MODIS 卫星反演 AOT 产品(以下简称“MODIS AOT”),如 NASA 发布的 MODIS 10 km 分辨率的全球 AOT 产品,而 MODIS 卫星虽然最大空间分辨率达到 250 mm,扫描宽度 2 330 km,但时间分辨率较低,一天最多仅可以获得 4 条过境轨道数据。随着葵花 8 号和 9 号气象卫星(Himawari-8/9)的发射和应用,基于该系列静止卫星的 AOT 产品(以下简称“Himawari AOT”)反演技术得到广泛研究和应用,通过该系列卫星可以获得大范围、时间分辨率达 10 min 的 AOT 产品<sup>[3]</sup>。LI et al.<sup>[4]</sup>和 WANG et al.<sup>[5]</sup>针对日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)发布的 Himawari AOT 产品在中国不同地区的适用性分别做了研究分析。使用 Himawari AOT 产品可以帮助业务和科研人员更加深入地理解大气污染物时空分布状况,加深对其发生机理、时空分布和传输机制的认识。

与直接影响公众健康的近地面污染不同,AOT 反映的是整个大气柱的污染程度。由于污染物主要集中在边界层中,在混合较好的情况下,AOT 与近地面大雾污染物质量浓度有较好的相关关系。WANG and CHRISTOPHER<sup>[6]</sup>使用美国亚拉巴马州杰弗逊县(Jefferson County)2002 年 7 个监测点地面大气污染物数据研究发现,基于 MODIS 反演的 AOT 与地面细颗粒物( $PM_{2.5}$ )有较好的相关性,相关系数达 0.7,月平均相关系数大于 0.9,AOT 可以用来定量地估计空气质量类别,在晴空条件下准确率超过 90%。GUPTA and CHRISTOPHER<sup>[7-8]</sup>研究表明通过引入气象因子可以显著改进 MODIS AOT 和  $PM_{2.5}$  的相关性,在反演地面  $PM_{2.5}$  质量浓度过程中,采用多元回归方法相比简单的二元回归可使回归系数( $R$ )由 0.6 提高到 0.8,而采用 ANN 方法进一

步提高了地面  $PM_{2.5}$  估算的质量, $PM_{2.5}$  小时值的回归系数  $R=0.74$ ,而日平均值的回归系数可达 0.78。然而 MODIS AOT 与  $PM_{2.5}$  的相关性在不同的区域和不同季节存在一定的差异<sup>[9]</sup>。LI et al.<sup>[10]</sup>认为受气溶胶构成和大气条件差异的影响,MODIS AOT 与  $PM_{10}$  的相关性存在显著的季节和地区差异。王静等<sup>[11]</sup>认为 MODIS AOT 和  $PM_{2.5}$  均有明显的季节性变化特征,二者的日均值相关性在冬半年要明显低于夏半年,MODIS AOT 可以作为监测  $PM_{2.5}$  分布以及传输的有效补充手段。XU et al.<sup>[12]</sup>分析了华北平原 MODIS AOT 和地面  $PM_{2.5}$  季节变化反位相问题。目前,在国内外研究中,针对区域性 AOT 时空分布特征及其与地面污染物的关系研究仍有待进一步深化,尤其是基于静止卫星气溶胶反演产品,开展更高时间分辨率分析研究还相对较少。本研究将以山东为研究区域,基于 Himawari AOT 产品,深入分析 AOT 的时空分布特征及其与地面主要污染物质量浓度的相关性,以期加深对区域性污染时空分布的认识。

## 1 数据与方法

本研究使用 JAXA 发布的 Himawari AOT 产品(ftp://ftp.ptree.jaxa.jp/pub/,下文中如无特别说明,AOT 均指 Himawari AOT 作为研究数据)。该产品以 YOSHIDA et al.<sup>[13]</sup>研制的海洋陆地一体化 AOT 反演产品(Level 2)为基础。KIKUCHI et al.<sup>[14]</sup>对该产品做了技术改进,研制了两种逐小时产品(Level 3),一是基于  $AOT_{original}$  而使用更加严格的云遮蔽方案生成的  $AOT_{pure}$ ,二是在  $AOT_{pure}$  基础之上时空插值计算得到的  $AOT_{merged}$ 。本研究使用  $AOT_{merged}$  作为研究数据,该产品覆盖范围为  $60^{\circ}S \sim 60^{\circ}N$ ,  $90^{\circ} \sim 120^{\circ}E$ ,空间分辨率为经纬度间隔  $0.05^{\circ}$ ,时间分辨率为 1 h,数据时段为 2017 年 7 月 7 日 12 时—2020 年 7 月 7 日 11 时(北京时,下同),共 3 a 的数据。

山东空气质量监测点主要分布在城市中。地级市在 2005 年之后建立了相对稳定的监测网,可得到持续的污染物质量浓度逐小时数据,县级市的空气质量监测工作起步较晚且参差不齐,数据长度较短。因此本研究主要使用地级市污染物监测数据作为研究对象。考虑到海洋上空的海盐气溶胶对沿海地区的空气质量和 AOT 有重要影响<sup>[15]</sup>,且在不同的天气条件下,影响的空间范围和程度存在差异,而本研究主要关注人类活动排放的大气污染物的分布,为此,舍弃了距离海岸线 30 km 之内的沿海

城市的地面大气污染物质量浓度观测数据,以便在研究 AOT 与地面大气污染物质量浓度相关关系时排除海盐气溶胶的影响。研究中共使用了山东 11 个城市的数据,考虑数据的时间连续性,实际使用站点共计 89 个,各地级市站点数量见表 1。

在研究 AOT 与污染物时间分布差异和相关性时,本研究将 AOT 插值到 89 个环境空气质量监测站点进行分析。需要说明的是,在分析污染物时间变化时,只选取了与 AOT 对应时刻的数据。通过使用全部数据计算得到的污染物时间分布特征对

比,除数值存在细小差别外,变化趋势是完全一致的。JAXA 的 AOT 逐小时数据是过去 1 h 内逐 10 min AOT 的合成值,而地面监测的污染物质量浓度是过去 1 h 的平均值,因此二者具有较好的一致性。由于卫星反演 AOT 只能在白天进行,而且极易受到云的影响。JAXA 的 AOT 数据对云进行了较为严格的检测,排除了云区,实际每次反演的 AOT 覆盖水平空间范围较小。3 a 之中,插值到站点并对应地面大气污染物质量浓度实测数据的总有效样本量为 152 337 个,能够满足统计分析要求。

表 1 各市监测站点数量

Table 1 Number of stations in 11 cities of Shandong

城市	济南	淄博	菏泽	潍坊	济宁	泰安	临沂	滨州	枣庄	德州	聊城
站点数	20	13	7	9	7	7	6	4	7	5	4

由于太阳高度和云覆盖的变化,AOT 反演数据在不同的季节和白天不同时刻的数据量也不同。统计了 3 a 间有效样本数量分布特征,由日变化(07—19 时,图 1a)来看,AOT 样本数从 07—10 时快速上升,10 时之后缓慢下降,10—15 时是一天之中样本数量最多的时段,15 时之后样本数量快速下降,19 时降为 0,夜间没有 AOT 数据。AOT 样本数 3—5 月和 10—12 月最多(图 1b),可能与春季和秋冬交替季节云量较少有关;而 6—8 月样本数量最少,其中 8 月仅有 3 658 个,这与汛期降水偏多,云量多且覆盖时间长是一致的。

本研究使用了欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)的 ERA5 再分析数据作为分析边界层和大气垂直要素分布的基本数据。ERA5 是目前最优的大气历史状态分析,本研究使用了其中的边界层高度(boundary layer height,BLH)数据,空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,时间间隔为 1 h。

## 2 AOT 时空分布特征

### 2.1 空间分布特征

#### 2.1.1 年平均分布特征

本研究使用 3 a 的数据料分析了 AOT 的整体空间分布。由 AOT 的平均分布(图 2)来看,山东气溶胶光学厚度较低的区域主要有两个:一是鲁中山区,包括泰山丘陵并延伸到沂山山脉;二是半岛丘陵并延伸到海阳、乳山沿海。另外,滨州的小部分地区 AOT 也较低。AOT 的高值区主要分布:一是山

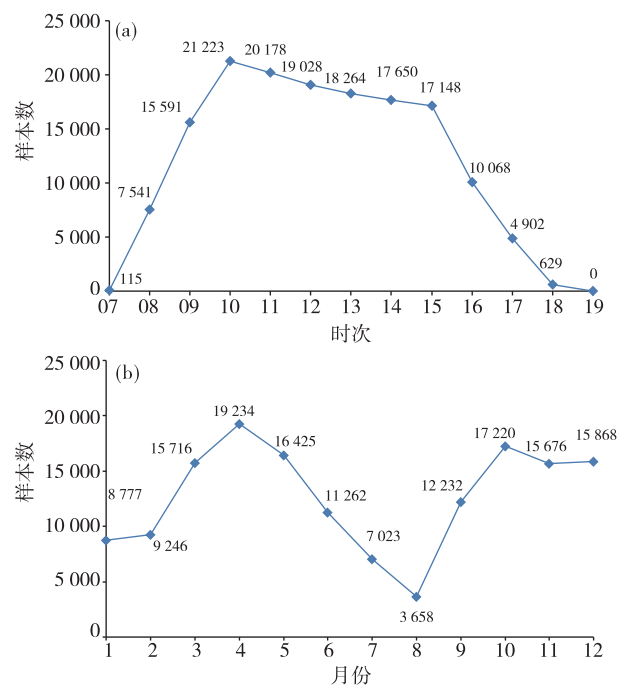


图 1 山东 AOT 反演样本数量的逐时(a)和逐月(b)分布

Fig.1 Hourly (a) and monthly (b) distribution of sample size of retrieval AOT in inland areas of Shandong

东西部与河南、河北接壤的市县,即德州、聊城以及菏泽西部;二是山东南部与江苏接壤地区,包括菏泽东部和济宁南部一带;三是渤海南部至莱州湾沿岸一带。另外,临沂、潍坊、泰安等城市周围也有较为分散的 AOT 高值区。总的来看,人口和工业活动较少的山区及半岛南部的部分沿海地区气溶胶质量浓度较低,空气质量最佳;而人口密集、工业活动

较多的地区气溶胶质量浓度较大。在考虑大气污染物跨省传输问题时,以上较大范围连片的 AOT 高值区值得关注。

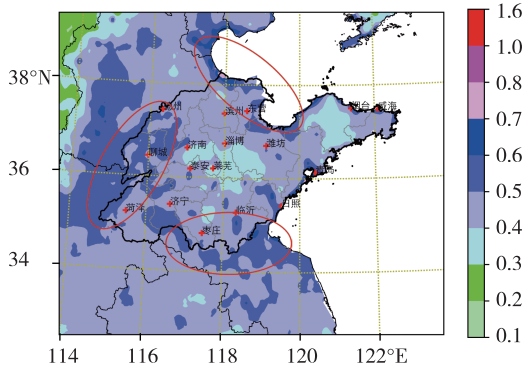


图2 山东及周边 AOT 年平均分布(填色表示 AOT,红色十字表示城区位置,红圈表示 AOT 高值区)

Fig.2 Annual mean distribution of AOT in Shandong and surrounding areas (colored area for AOT, red cross for location of city, red circle for area of high AOT)

### 2.1.2 季节分布特征

整体来看,四季之中,夏季(6—8月)AOT 值最高,秋季(9—11月)次之,冬季(12月—次年2月)最小。这与 MA and YU<sup>[2]</sup>使用地基气溶胶观测网(AERONET)和多种极轨卫星监测反演产品(包括

MODIS、MISR 等),以华北的香河站为代表得到的季节变化特征是一致的。然而,冬季是空气污染最重的季节,而夏季是地面  $PM_{2.5}$  质量浓度最低的季节,与 AOT 季节变化趋势相反。XU et al.<sup>[12]</sup> 针对 MODIS AOT 与地面  $PM_{2.5}$  季节变化趋势相反的现象,使用 CALIOP 卫星得到的气溶胶垂直结构(aerosol vertical structure, AVS)分析指出, AVS 在不同季节存在显著差异,尤其是夏季 532 nm 的 AVS 中距地面 500 m 和 1 000 m 存在一个鼻状峰值,主要是由气溶胶吸湿增长造成的,大约占整个大气柱 AOT 的 40%;而在冬季,532 nm 的 AVS 中,与地面  $PM_{2.5}$  关系密切的底层 AOT 取值最高。根据 XU et al.<sup>[12]</sup> 的研究结论, AVS 和湿度在 AOT 的季节变化中发挥了一定的作用。

山东不同季节的 AOT 低值区基本一致,与年均分布低值区基本一致,而大值区存在一定差异。山东春季(3—5月)AOT 的空间分布与年均分布相似程度较高(图 3a), AOT 值在 0.3~0.6 之间,大值区和年平均分布基本一致。夏季 AOT 分布与其他季节存在显著差异(图 3b), AOT 较大的区域位于聊城东部、德州以及鲁中山区北侧,鲁中山区东侧和西南侧, AOT 最高可达 1.0。山东秋季鲁西南和鲁东

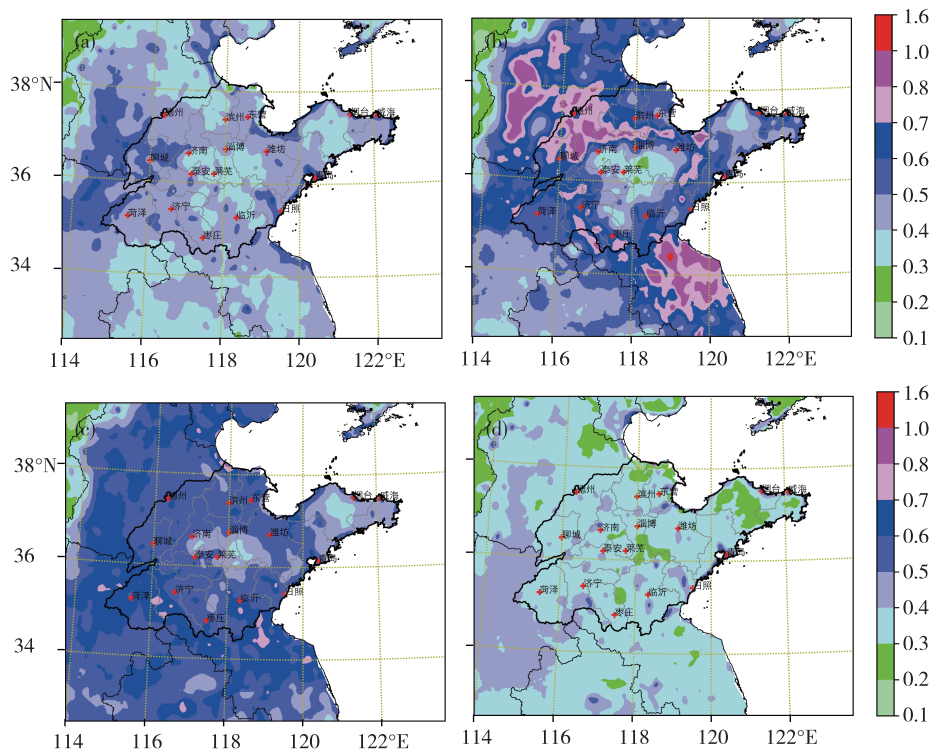


图3 山东及周边 AOT 各季节平均分布(填色表示 AOT; a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)

Fig.3 Seasonal mean distribution of AOT in Shandong and surrounding areas (colored area for AOT; a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

南的部分地区为 AOT 的大值区(图 3c),最大值为 0.8,其中,鲁西南的大值区与河南河北一带的大值区连成一片,鲁东南的大值区与苏北一带相连。冬季山东没有大片的 AOT 高值区(图 3d),气溶胶质量浓度较高的区域分布零散,整体上,山东半岛小于省内其他地区,山东西部与外省接壤的地方形成较为明显的分界线。

2.2 时间分布特征

2.2.1 AOT 时间变化特征

不同的地区、不同的季节,AOT 的日变化规律有明显的差异<sup>[9]</sup>。本研究分析了 3 a 间山东白天 AOT 的逐时变化。一天之中,AOT 呈现双峰型分布(图 4a),上午呈现下降趋势,中午前后开始上升,14 时达到最大值,然后开始下降。AOT 最高的时间为 14 时,AOT 平均值达到 0.608,13—15 时的 AOT 均在 0.5 以上。由 AOT 的逐月平均值(图 4b)来看,AOT 两个显著的峰值分别出现在 6 月和 10 月,平均值分别为 0.648 和 0.622;2 月最低为 0.339,1 月和 8 月的 AOT 值为次低,分别为 0.370 和 0.377。

2.2.2 与主要污染物时间分布的对比

地面空气污染物中颗粒物对能见度有直接影响,与 AOT 密切相关。本研究首先对比山东 AOT 与 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>的日变化特征和月际变化(图 5)差异。颗粒物的日变化特征较为一致,白天时段均为

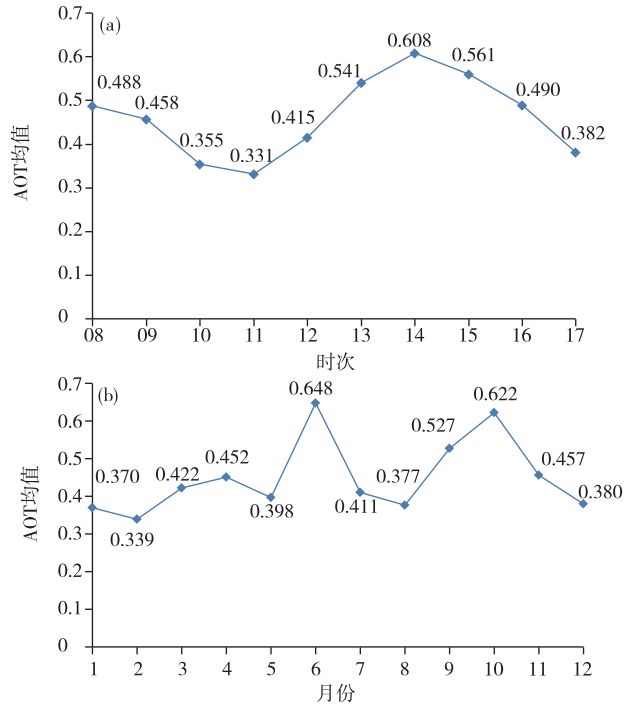


图 4 山东 AOT 的逐时(a)和逐月(b)变化  
Fig.4 Hourly (a) and monthly (b) variation of AOT in Shandong

单峰结构,白天最大值出现在 11 时左右,PM<sub>2.5</sub>质量浓度的最大值为 67.0 μg · m<sup>-3</sup>,PM<sub>10</sub>最大质量浓度为 138.7 μg · m<sup>-3</sup>。PM<sub>2.5</sub>的月际变化中,夏季质量浓度最低,其中 7 月为全年最低值,冬季最高,1 月

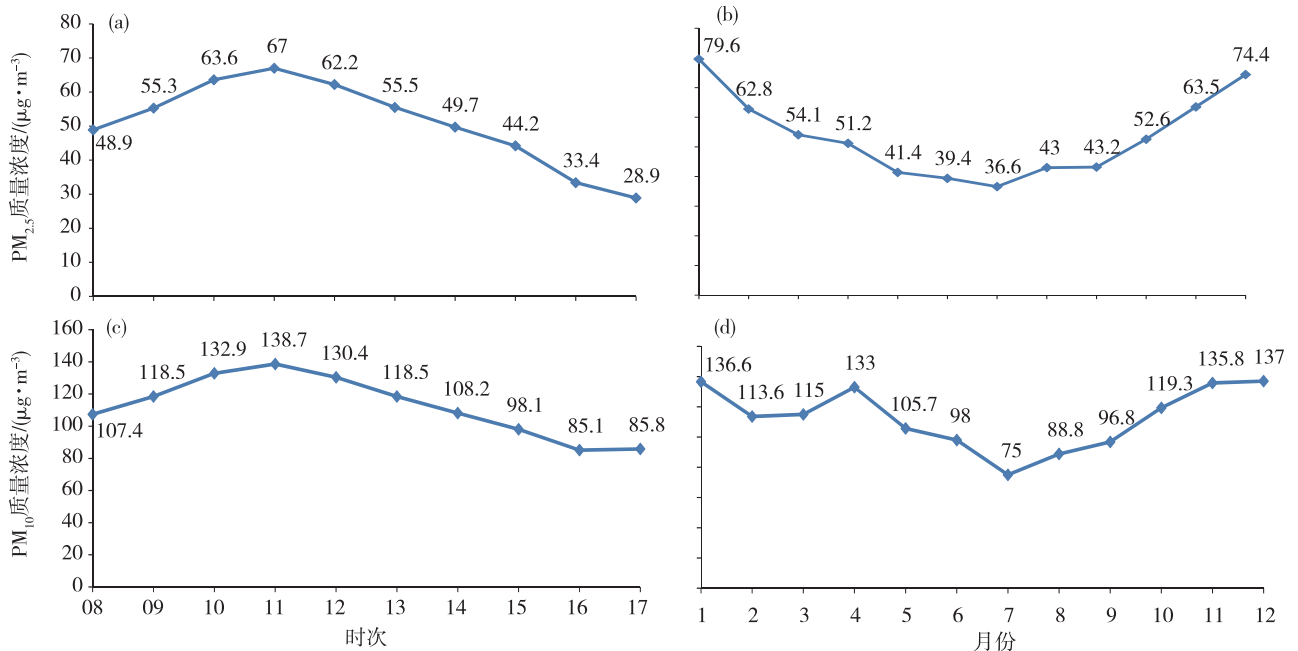


图 5 山东颗粒物质量浓度(单位:μg · m<sup>-3</sup>)的日变化(a. PM<sub>2.5</sub>,c. PM<sub>10</sub>)和月际变化(b. PM<sub>2.5</sub>,d. PM<sub>10</sub>)  
Fig.5 Diurnal (a. PM<sub>2.5</sub>, c. PM<sub>10</sub>) and monthly (b. PM<sub>2.5</sub>, d. PM<sub>10</sub>) variation (units: μg · m<sup>-3</sup>) of mass concentrations of particulate matters in Shandong

为全年最高值;PM<sub>10</sub>的季节变化与PM<sub>2.5</sub>类似,不同之处在于PM<sub>10</sub>在4月出现除冬季外的另一个高峰。以上表明,无论是日变化还是月际变化,颗粒物与AOT均存在明显的差异。其中,二者在日变化上分别呈现单峰和双峰结构,相关性较差,而在月际变化上,冬夏季高低取值相反,总体呈现一定的负相关。

另外,本研究还分析了AOT与O<sub>3</sub>在时间分布上的差异。虽然,O<sub>3</sub>的强吸收带并不在Himawari AOT卫星反演的波长范围内<sup>[16-17]</sup>,O<sub>3</sub>自身不会对卫星AOT产生直接影响,但以O<sub>3</sub>为主要成分之一的光化学烟雾降低能见度,直接影响AOT。因此,AOT与O<sub>3</sub>有一定的联系。地面环境空气中的O<sub>3</sub>主要来源于光化学反应,是氮氧化物和碳氢化合物在大气环境中受太阳紫外线照射后产生一种新的二次污染物,白天随着光化学反应的不断进行,O<sub>3</sub>质量浓度产生积累。本研究统计了山东O<sub>3</sub>日变化特征(图6a),08—09时是O<sub>3</sub>质量浓度一天之中最低的时段,此后至17时,呈现单边上升的变化趋势,17时为全天最高,达到163.8 μg·m<sup>-3</sup>。由逐月变化(图6b)看,一年之中O<sub>3</sub>质量浓度较高的月份为3—9月,其中6月最高,为155.0 μg·m<sup>-3</sup>;8月低于7月和9月,而8月样本数量较少可能造成一定的代表性误差。11月、12月和1月是O<sub>3</sub>质量浓度一年之中最低的时段,其中12月最低,为44.7 μg·m<sup>-3</sup>。

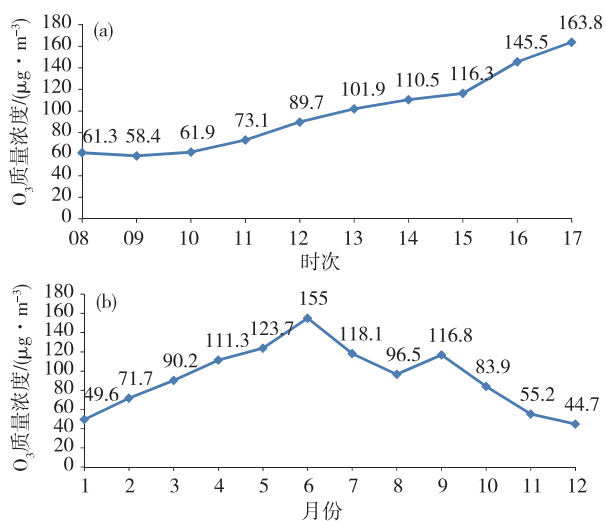


图6 山东O<sub>3</sub>质量浓度的逐时(a)和逐月(b)变化(单位:μg·m<sup>-3</sup>)

Fig.6 Hourly (a) and monthly (b) variation of mass concentration (units: μg·m<sup>-3</sup>) of O<sub>3</sub> in Shandong

以上分析表明,AOT与O<sub>3</sub>的日变化存在明显的差异,相关性较差;而逐月变化存在一定的相似性,均呈双峰型,且第一个峰值均出现在6月,与第二个峰值的出现相差一个月。在相关性研究中,应考虑以上特点。

### 3 AOT与污染物质量浓度的相关性

#### 3.1 总体相关性

首先,使用全部有效样本(即逐站点小时值)计算了AOT与环境空气主要污染物质量浓度(Cond)的相关关系,如表2所示,相关系数均通过 $P < 0.001$ 显著性水平检验。AOT与SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和CO与AOT的相关系数绝对值小于等于0.03,几乎无相关性;AOT与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和O<sub>3</sub>均呈正相关,其中,AOT与PM<sub>2.5</sub>的相关系数最高为0.28,AOT与O<sub>3</sub>的相关系数为0.22。在大气柱中,污染物在边界层中的总量占据绝大部分,如果污染物在边界层中的分布相对均匀,地面污染物质量浓度与边界层高度的乘积在一定程度上反映了污染物的总量。其中,PM<sub>2.5</sub>和AOT存在以下关系<sup>[6]</sup>:

$$H_{AOT} = \rho_{PM_{2.5}} H_{BL} S \quad (1)$$

式中: $H_{AOT}$ 表示气溶胶光学厚度, $\rho_{PM_{2.5}}$ 表示PM<sub>2.5</sub>质量浓度, $H_{BL}$ 是边界层高度, $S$ 是主要受湿度条件影响的消光系数。为此,本文进一步计算了6种主要污染物质量浓度(Cond)和边界层高度(BLH)之积与AOT的相关系数,相关系数均通过 $P < 0.001$ 显著性水平检验,结果显示相关系数提高并不显著。其中,PM<sub>2.5</sub>质量浓度与AOT的相关系数有所增加,由0.28增加到0.33;PM<sub>10</sub>由0.22升为0.23;O<sub>3</sub>有所下降,由0.22降至0.19。

表2 AOT与主要污染物质量浓度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between AOT and mass concentrations of main pollutants

主要污染物	Cond与AOT相关系数	Cond×BLH与AOT相关系数
PM <sub>2.5</sub>	0.28	0.33
PM <sub>10</sub>	0.22	0.23
SO <sub>2</sub>	-0.01	0.05
NO <sub>2</sub>	0.02	0.10
CO	0.01	0.01
O <sub>3</sub>	0.22	0.19

注:Cond表示主要污染物质量浓度,BLH表示边界层高度。

以上结果显示,AOT与近地面空气污染物质量

浓度的相关性远低于 WANG and CHRISTOPHER<sup>[6]</sup> 使用 MODIS AOT 得出的相关性。这可能是不同的地域, 污染物构成和气象条件差异造成的, 也可能与 MODIS AOT 仅包含固定的卫星过境时刻的观测数据, 而 Himawari AOT 包含整个白天的数据, 而受日变化差异的影响有关。另外, 在考虑边界层高度的情况下, Himawari AOT 与颗粒物的相关性有所增加, 而与  $O_3$  的相关性有所下降, 显示出  $O_3$  在边界层中的垂直分布与颗粒物存在一定差异, 除了边界层高度外, 存在影响  $O_3$  与 AOT 相关性的其他重要因子。

### 3.2 相关性的日变化

本研究分析了白天 AOT 与各种主要污染物的相关系数, 大部分通过了  $P < 0.01$  显著性水平检验, 如图 7 所示。总体来看, 15—17 时是 AOT 与污染物相关性最强的时间段。而 10 时则是 AOT 与污染物相关性最差的时间。对于  $O_3$  而言, 与 AOT 相关系数最高的时间为 16 时, 相关系数为 0.35, 白天总体呈现单边上升的趋势, 17 时略低于 16 时。对于颗粒物而言, 与 AOT 相关性最差的时间为 10 时, 与 AOT 相关系数最高的时间为 17 时。

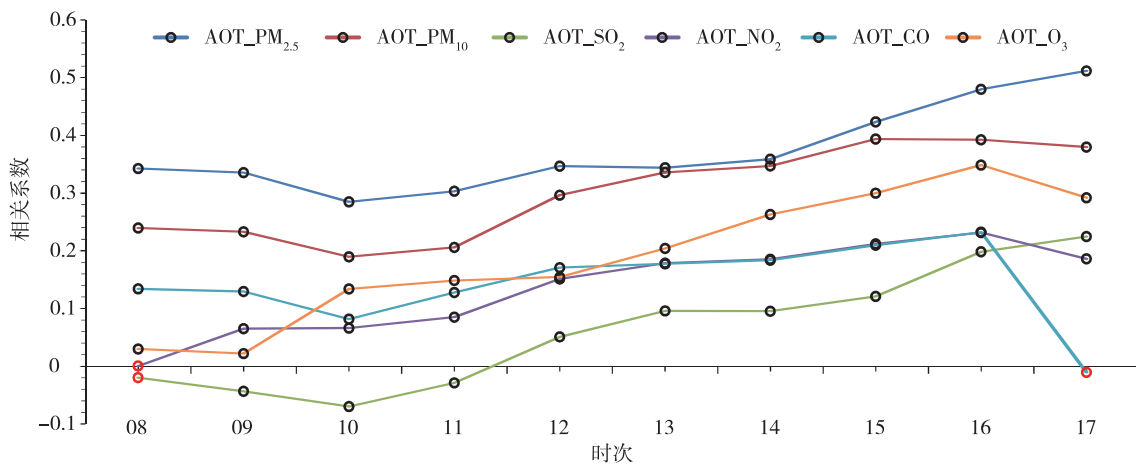


图 7 AOT 与主要污染物 ( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$ 、 $O_3$ ) 质量浓度相关系数逐时变化 (黑色圆圈表示通过  $P < 0.01$  显著性水平检验, 红色圆圈表示未通过)

Fig.7 Hourly variation of correlation coefficients between AOT and mass concentrations of main pollutants ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ , and  $O_3$ ) (black circle denotes passing the significance test of  $P$  lower than 0.01, red circle means failure of passing the test)

### 3.3 相关性的月际变化

本研究分析了 1—12 月, AOT 与各种主要污染物的相关系数, 大部分通过了  $P < 0.01$  显著性水平检验, 如图 8 所示。1—8 月和 11—12 月, 污染物质量浓度与 AOT 相关系数最高的是  $PM_{2.5}$ ; 而 9—10 月与 AOT 相关系数最高的是  $O_3$ 。一年之中, 总体上, 6 月的 AOT 与污染物的相关程度最低, 1 月的相关性最高。对于  $PM_{2.5}$  而言, 1 月份与 AOT 的相关系数最高, 达 0.56, 而 6 月最低, 仅为 0.20;  $O_3$  质量浓度与 AOT 的相关系数秋季和 2 月、3 月最高, 夏季  $O_3$  质量浓度最高的季节相关性最差, 可能与二者的日变化差异有关。

以上分析表明, 就山东而言, AOT 与  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  等主要污染物质量浓度的相关性整体不高, 基于 AOT 分析和反演地面污染状况, 应考虑二者在月际变化和日变化上的显著差异。在提高 AOT 与地面污染物质量浓度的拟合关系时, 还应当纳入更多的

因子, 如与污染相关的气象要素。

## 4 小结

本文使用 2017 年 7 月—2020 年 7 月 JAXA 发布的基于 Himawari-8/9 卫星反演的 AOT 产品、地面环境空气质量监测站数据和 ECMWF 的 ERA5 再分析数据, 研究了山东 AOT 时空分布特征, 以及 AOT 与  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  等近地面污染物质量浓度的相关关系, 并得出了以下结论。

1) 整体而言, 山东省年平均 AOT 较低的区域主要分布在泰山丘陵、沂山山脉, 半岛丘陵并延伸到海阳、乳山沿海, 低值区的分布在不同季节基本一致。年平均 AOT 高值区主要分布在山东西部、南部与外省接壤的部分市县, 以及渤海南部至莱州湾沿岸一带。以上地区在气溶胶的跨区传输问题研究中值得关注。不同季节 AOT 的高值区分布存在一定差异。其中, 夏季高值区分布与其他季节差异较



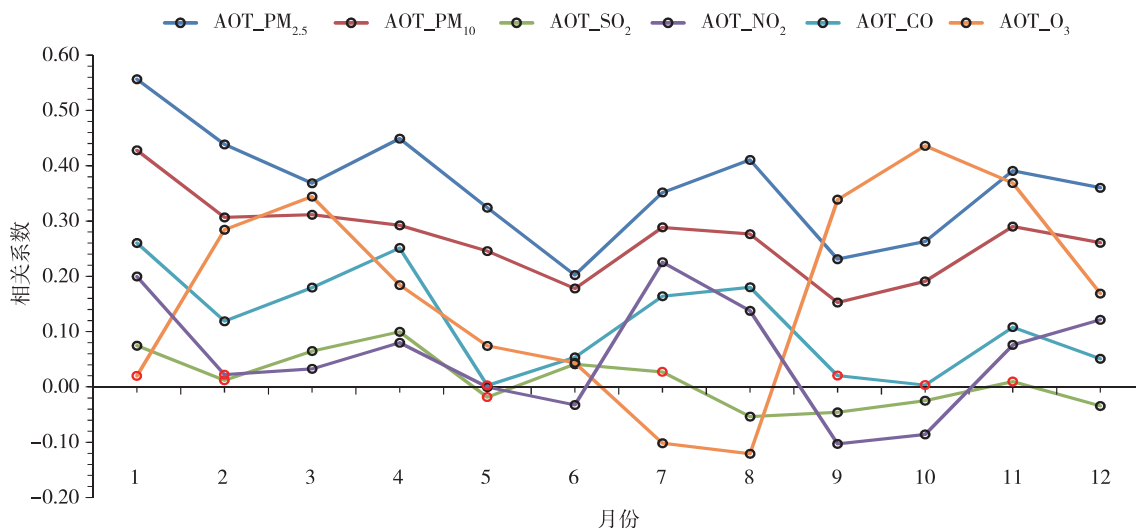


图8 AOT与主要污染物( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$ 、 $O_3$ )质量浓度相关系数逐月变化(黑色圆圈表示通过 $P < 0.01$ 显著性水平检验,红色圆圈表示未通过)

Fig.8 Monthly variation of correlation coefficients between AOT and mass concentrations of main pollutants ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ , and  $O_3$ ) (black circle denotes passing the significance test of  $P$  lower than 0.01, red circle means failure of passing the test)

为显著。

2) 山东 AOT 日变化呈现双峰型分布,上午呈现下降趋势,中午前后开始上升,14 时达到白天最大值 0.608,然后逐步下降;AOT 的逐月分布中,两个显著的峰值分别出现在 6 月和 10 月(分别为 0.648 和 0.622),2 月最低,为 0.339,1 月和 8 月的 AOT 值为次低。山东颗粒物与 AOT 在日变化上分别呈现单峰和双峰结构,相关性较差,而在月际变化上,总体呈现一定的负相关;一年之中,AOT 夏季最高,冬季最低,与地面  $PM_{2.5}$  质量浓度相反。AOT 与  $O_3$  的日变化存在明显的差异,而逐月变化存在一定的相似性,均呈双峰型。

3) 总体上 AOT 与  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  等主要污染物质量浓度的相关性整体不高,与前人研究结果有一定的差异,可能与不同区域的污染特征和气候差异有关。一年之中,总体上,6 月的 AOT 与污染物的相关程度最低,1 月的相关性最高。15—17 时是 AOT 与污染物相关性最强的时间段。而 10 时则是 AOT 与污染物相关性最差的时间。

本研究表明,虽然 AOT 一定程度上反映了大气污染的程度,但是单凭 AOT 难以准确反映污染物的分布特征,建议纳入更多的因子进行分析,如与环境空气污染相关的气象要素等。本研究对于通过卫星进一步加强地面环境空气污染综合监测分析有一定的促进作用,虽然所得出结论主要针对山东范围,但对于其他污染背景相似的地区,尤其是地

理位置相邻且气候背景相近的京津冀有较好的适用性。需要指出的是,本研究使用了 JAXA 提供的基于 Himawari-8/9 卫星的 AOT 产品,而不同的卫星和反演方法得到的 AOT 可能存在一定的差异;另外,本研究使用了 3 a 的白天逐时卫星 AOT 数据,但由于每个时次的 AOT 数据覆盖范围不同,因此难以保障每个格点具有完全相同的覆盖频率,因而有必要在未来使用更多的数据,针对大气污染新的变化特征做进一步的分析和研究。

#### 参考文献:

- [1] 万薇,张伟豪,卞蕾,等.大气中国 2020:中国大气污染防治进程[R].马尼拉:亚洲清洁空气中心,2020.
- [2] MA X Y, YU F Q. Seasonal and spatial variations of global aerosol optical depth: Multi-year modelling with GEOS-Chem-APM and comparisons with multiple-platform observations [J]. *Tellus Ser B: Chem Phys Meteor*, 2015, 67(1): 25115.
- [3] JAXA Earth Observation Research Center. JAXA Himawari Monitor Aerosol Products [EB/OL]. (2020-03-03) [2020-11-01]. <https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index.html>.
- [4] LI D, QIN K, WU L X, et al. Evaluation of JAXA Himawari-8-AHI level-3 aerosol products over eastern China [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(4): 215.
- [5] WANG L, CAI K, SI Y D, et al. Evaluation of Himawari-8 version 2.0 aerosol products against

- AERONET ground-based measurements over central and northern China[J]. *Atmos Environ*,2020,224:117357.
- [6] WANG J, CHRISTOPHER S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and  $PM_{2.5}$  mass: Implications for air quality studies[J]. *Geophys Res Lett*,2003,30(21):2095.
- [7] GUPTA P, CHRISTOPHER S A. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach [J]. *J Geophys Res: Atmos*,2009,114(D14):D14205.
- [8] GUPTA P, CHRISTOPHER S A. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: 2 A neural network approach [J]. *J Geophys Res: Atmos*,2009,114(D20):D20205.
- [9] 焦利民,张博恩,许刚,等.气溶胶光学厚度与  $PM_{2.5}$  浓度相关关系的时空变异[J].*干旱区资源与环境*,2016,30(12):34-39.
- [10] LI C, HSU N C, TSAY S C. A study on the potential applications of satellite data in air quality monitoring and forecasting [J]. *Atmos Environ*, 2011, 45 ( 22 ): 3663-3675.
- [11] 王静,杨复沫,王鼎益,等.北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和  $PM_{2.5}$  质量浓度的特征及其相关性[J].*中国科学院研究生院学报*,2010,27(1):10-16.
- [12] XU J, HAN F, LI M Z, et al. On the opposite seasonality of MODIS AOD and surface  $PM_{2.5}$  over the Northern China Plain[J].*Atmos Environ*,2019,215:116909.
- [13] YOSHIDA M, KIKUCHI M, NAGAO T M, et al. Common retrieval of aerosol properties for imaging satellite sensors [J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 2018, 96B:193-209.
- [14] KIKUCHI M, MURAKAMI H, SUZUKI K, et al. Improved hourly estimates of aerosol optical thickness using spatiotemporal variability derived from Himawari-8 geostationary satellite [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*,2018,56(6):3442-3455.
- [15] 刘建,吴兑,范绍佳,等.台风对沿海城市细粒子中海盐气溶胶的影响[J].*环境科学学报*,2017,37(9):3255-3261.
- [16] GORSHELEV V, SERDYUCHENKO A, WEBER M, et al. High spectral resolution ozone absorption cross-sections-Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293 K [J]. *Atmos Meas Tech*,2014,7(2):609-624.
- [17] SONG J J, XIA X A, CHE H Z, et al. Daytime variation of aerosol optical depth in North China and its impact on aerosol direct radiative effects[J]. *Atmos Environ*,2018,182:31-40.