

范伟,邱康俊,凌新锋,等,2020. 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,46(4):528-537. Fan W, Qiu K J, Ling X F, et al, 2020. Analysis of aerosol optical and microphysical properties in central part of Huaihe River Basin based on remote sensing measurement[J]. Meteor Mon, 46(4):528-537(in Chinese).

## 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\*

范伟<sup>1,2,3,4</sup> 邱康俊<sup>5</sup> 凌新锋<sup>3,4</sup> 黄勇<sup>1,2,3,4</sup>

1 安徽省气象科学研究所,合肥 230031

2 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室,合肥 230031

3 寿县国家气候观象台,安徽寿县 232200

4 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地,安徽寿县 232200

5 安徽省气象信息中心,合肥 230031

**提 要:** 利用设置在中国气象局寿县国家气候观象台 2017 年全年的太阳-天空辐射计 CE318 数据,对当地一年四季气溶胶光学和微物理特征进行分析。结果表明:春季气溶胶光学厚度最高,夏季和秋季最为接近,也最低,冬季介于夏、秋季之间;AE 数据集中在 0.9~1.5,以细模态粒子为主;四季的气溶胶体积谱分布基本相似,且既有细模态粒子,也有粗模态粒子;夏季气溶胶折射率实部最小,说明当地夏季水汽含量最大,实部与光谱波长没有明显关系,而虚部则有;单次散射反照率均在 80% 以上,气溶胶散射效应明显;非球形粒子占主要支配地位且在春季数量最多。研究结果对于掌握淮河流域中部区域气溶胶特征,及其对大气辐射、气候变化的影响,监测空气质量,以及提高我国该特定区域大气辐射传输模型计算精度有重要意义。

**关键词:** 光学特征,微物理特征,气溶胶,寿县,太阳-天空辐射计观测网(SONET)

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.04.007

## Analysis of Aerosol Optical and Microphysical Properties in Central Part of Huaihe River Basin Based on Remote Sensing Measurement

FAN Wei<sup>1,2,3,4</sup> QIU Kangjun<sup>5</sup> LING Xinfeng<sup>3,4</sup> HUANG Yong<sup>1,2,3,4</sup>

1 Anhui Institute of Meteorology and Sciences, Hefei 230031

2 Anhui Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

3 Shouxian National Climatology Observatory, Anhui, Shouxian 232200

4 Huaihe River Basin Typical Farmland Ecological Meteorological Field Science Experiment Base of CMA, Anhui, Shouxian 232200

5 Anhui Meteorological Information Centre, Hefei 230031

**Abstract:** Using the whole year's sun-sky radiometer CE318 data in 2017 observed by National Climatology Observatory in Shouxian County set by China Meteorological Administration, the aerosol optical and microphysical characteristics in the local area were analyzed. The results show as follows. The aerosol optical depth is the highest in spring, similarly lowest in summer and autumn, and in winter it is between them. AE data are concentrated in the range of 0.9-1.5, mainly in the form of fine mode particles. The aerosol

\* 国家重点研发计划(2016YFC0201902)、国家自然科学基金项目(41875171 和 41705014)、中国科学院 STS 科技服务网络计划区域重点项目(KFJ-STG-QYZD-022)、安徽省自然科学基金项目(1708085MD95 和 1608085MD84)、安徽省重点研究和开发计划项目(1804a0802215)、淮河流域气象开放研究基金项目(HRM201506)和 2019 年度安徽省气象局气象科技发展基金项目(KM201905)共同资助

2018 年 12 月 22 日收稿; 2020 年 2 月 11 日收修定稿

第一作者:范伟,主要从事大气光学、遥感研究. Email: warrenfw@126.com

volume size distributions in four seasons are basically similar, and there are both fine and coarse mode particles. The real part of the refraction index of aerosol in summer is the smallest, indicating that the water vapor content in summer is the largest, and the real part has no obvious relation with the wavelength, while the imaginary part has. The single scattering albedo is above 80%, and the scattering effect of aerosol is obvious. Non-spherical particles dominate and are most abundant in spring. These findings have great significance for mastering aerosols characteristics, for researching the atmospheric radiation, climate change and air quality monitoring, and for improving the calculation accuracy of atmospheric radiation transfer model in specific regions in central part of Huaihe River Basin.

**Key words:** optical characteristics, microphysical characteristic, aerosol, Shouxian County, Sun-Sky radiometer Observation Network (SONET)

## 引言

气溶胶光学和微物理特征是影响大气辐射、气候变化的重要参数,其随时空变化具有一定的不确定性,并且也受到下垫面的影响。通过仪器测量并进行统计得到当地大气气溶胶特征,对于研究试验点气象特征及气候变化等具有重要意义。地基遥感探测仪器——太阳-天空辐射计 CE318 通过测量太阳直射和天空辐射,反演测量点大气气溶胶参数,如气溶胶光学厚度(AOD)、体积谱分布、单次散射反照率等,得到当地大气气溶胶光学和微物理特性变化,以及实现对空气质量的监测等(中国气象局监测网络司,2010)。

国内外应用 CE318 对大气气溶胶光学特性进行分析研究已有不少相关报道,主要是对 CE318 测量结果进行时间序列统计性研究,如 Salinas et al (2009)在新加坡应用一年测量数据(数据质量控制在 1.5 或 2.0),研究从 2006 年 11 月至 2007 年 10 月 AOD 逐月和逐季节的变化。此外,CE318 另一个重要应用就是美国和法国合作采用 CE318 在全球布设 500 多个站点监测全球气溶胶变化,形成气溶胶网——AERONET (Aerosol Robotic Network),并且和南京信息工程大学进行合作。

在中国,通过 CE318 对气溶胶光学特性的研究已开展十几年。早在 2002 年,张玉香等(2002)对北京市大气气溶胶光学特性进行了研究,对晴空及沙尘天气下气溶胶荣格参数变化进行分析。刘玉杰等(2004)针对我国西北银川地区进行气溶胶光学特性分析,对四种类型的日变化结合当地气象特征及人类影响进行了详细分析。胡方超等(2007)对 AOD 算法进行了改进,并实地测量验证了算法的精度,提

高了 AOD 计算精度。陈然等(2008)利用四个监测点对杭州地区气溶胶时空分布特征进行分析,得到了埃斯特朗系数变化规律及与 AOD 关系。杨志峰等(2008)对室内和野外标定方法进行了初探和误差分析,指出相对标定方法更能够保证仪器观测数据的准确性。宋广宁等(2013)对西北城市兰州进行了 AOD 变化测量,并详细地分析了日变化的原因。此外,范伟等(2006a;2006b)也应用连续波长太阳辐射计 PGS-100 和能见度仪 Model6230A 在合肥及沿海进行大气透过率、AOD、气溶胶消光系数及气溶胶标高等方面的研究。

2010 年左右,国内利用 CE318 选择具有代表性的不同地区进行了气溶胶特性区域性研究。在华北,通过北京的 AERONET 数据,研究了空气污染和气溶胶特性相关性(Che et al,2008)。在东北地区,通过 ASTOPWin 软件和 AERONET 数据,研究了龙凤山气溶胶光学特性(AOD 和埃斯特朗指数;Wang et al,2010)。在长三角经济区,对埃斯特朗波长指数和 AOD 进行了详细研究,发现在  $0.44 \mu\text{m}$  处对应的 AOD 月平均超过 0.70,而在太湖和临安则超过 0.80,埃斯特朗波长指数超过 1 (Pan et al,2010)。

近几年,国内对气溶胶参数研究更为细致,得到了更多有价值的研究成果。Che et al(2015)在东北详细分析了 2009—2013 年的气溶胶光学特征,包括 AOD、埃斯特朗指数、单次散射反照率(SSA),以及体积尺度分布。Li et al(2015)应用 AERONET CE318 观测数据,研究了北京和印度坎普尔这两个分别对应沙尘和精细粒子城市的气溶胶光学、物理特性和成分。此外,李正强等(2015)通过在中国气候代表性区域设置 CE318 光度计,组建太阳-天空辐射计观测网(Sun-Sky Radiometer Observation

Network, SONET), 并详细介绍了 SONET 特性, 测量原理和方法等。Ma et al(2016)在中国中部高山 SONET 测量反演的 AOD 和 MODIS 的 AOD 产品进行比较。所有这些通过 CE318 反演的结果给出了中国部分区域气溶胶特性。

CE318 通过广泛布点, 初步得到了针对我国有代表性的不同区域大气特点气溶胶长期观测结果, 并进行了详细对比。李正强等(2015)和 Xie et al(2015)利用在全国不同典型区域建立的 SONET 站点, 得到城市、乡村、海洋以及沙漠四种气溶胶模式下的气溶胶参数模型和变化分析结果。

近 10 年, 基于大气本底站的地基探测等方式对大气成分反演及天气机理研究也做了深入探索(张兴赢等, 2009; 林伟立等, 2009; 张琳娜和郭锐, 2014), 主要分析 AOD 反演技术、反应性气体数据订正方法及三种天气成因机理分析。

可以看到, 试验调查点主要集中在城市、山区和湖泊, 对有一定人类影响的农村区域研究不多。有的研究结果主要是 AOD、埃斯特朗指数和单次散射反照率等, 结果并不全面。

为获取高准确性、高精度、能够反映年代一世纪时间尺度变化的气温、降水等基准观测资料, 中国气象局在不同气候关键区, 选择了安徽寿县、内蒙古锡林浩特、甘肃张掖、云南大理、广东电白这五个具有区域代表性的气象观测站, 建设用于开展长期、稳定、连续的气候观测的国家气候观象台, 开展气候观测与技术研究与试验。例如, 研究沙尘气溶胶散射特性(田磊等, 2010), 以及对气象场的影响(周旭, 2016), 常规和野外站点观测的气象要素对比分析(王慧和李栋梁, 2010); 雷暴气候特征及演变分析(古明媚和张涛, 2016), 对流层至低平流层大气垂直结构分析(徐安伦等, 2016), 及海陆大气边界层特征分析(刘潇等, 2017)。观象台通常集约了地球系统综合观测平台, 包括地基气候观测系统、农业气象观测系统、气候基准观测系统、边界层观测系统和大气成分观测系统等。这对于提高综合气象观测能力、气象灾害防御和减灾, 以及满足气候变化需求, 有着重要意义。局部复杂的气溶胶光学特性依然会给当地气候变化、直接间接强迫辐射等评估带来很大的不确定性(Xie et al, 2015)。因此需要在观象台进行更多的气溶胶光学和微物理特性研究。

寿县国家气候观象台(32.43°N、116.78°E)地处淮河南岸, 位于我国南北气候过渡带, 是中国气象

局首批野外试验基地。受东亚季风区影响, 当地属北亚热带半湿润季风气候, 为气候敏感区, 天气系统种类繁多, 冬春冷、干旱少雨, 夏秋闷热多雨湿润, 冷暖和早涝转变急剧。其所在的淮河流域是我国的重要农业区之一, 平坦农田是下垫面的最主要成分, 农田覆盖区占该气候类型区总面积的 49.9%, 属于黄淮农业生态观测区。而且该地区是我国梅雨天气系统的主要活动区。寿县及其附近代表了我国东部半湿润半干旱季风区关键地区的下垫面特征, 是研究乡村型气溶胶模式并具有一定程度有人类活动影响下的地气之间相互作用及其机制的理想气候观测区。设置于寿县观象台的 CE318 测量点, 即将加入 SONET 网, 为 SONET 提供实时测量数据。

本文利用基于 CE318 在 2017 年全年的地基遥感测量(Li et al, 2015; 李正强等, 2015)资料, 研究寿县国家气候观象台一年四季气溶胶光学和微物理特性, 可以得到当地较详细的气溶胶特征, 能代表淮河流域中部区域乡村气溶胶特性, 并可进一步研究这一区域气溶胶对大气辐射、气候变化的影响, 进行空气质量监测等, 也可通过提供当地更加精准和实际大气状况的气溶胶参数, 来提高针对我国这一特定区域实际大气特点的大气辐射传输模型(6S、MODTRAN 等)的计算精度。

## 1 CE318 性能及测量、标定算法介绍

### 1.1 仪器性能简介

AOD 的测量可反映气溶胶粒子对太阳辐射的消光作用。通过测量太阳直接辐射, 从而反演得到整层 AOD、大气透过率、气溶胶光学特性等(中国气象局, 2010)。设置在寿县观象台的太阳-天空辐射计是法国 CIMEL 公司生产的 CE318。该仪器有 9 个波段, 分别是: 0.34、0.38、0.44、0.5、0.67、0.87、0.937、1.02 和 1.64  $\mu\text{m}$ 。通过自动跟踪太阳可进行太阳直接辐射测量, 还可以进行太阳等高度角天空扫描、太阳主平面扫描等。CE318 不仅是一种大气气溶胶环境监测仪器, 也可在遥感卫星传感器辐射定标时进行大气光学参数的测量。光学头瞄准筒视场角大小为 1.2°, 半波宽度在 0.34 和 0.38  $\mu\text{m}$  为 4 nm, 其他波段为 0.01  $\mu\text{m}$ , 四象限太阳跟踪器跟踪精度优于 0.1°, 太阳直接辐射测量误差在 2% 以内, 天空散射辐射测量误差在 5% 以内(中国气象

局,2010)。

## 1.2 测量和标定算法

CE318 反演的气溶胶参数包括了 AOD、埃斯特朗指数(AE)、体积谱分布(VSD)、单次散射反照率(SSA)、气溶胶复折射率指数(ACRI)和球形粒子百分比(PSP)概率分布等,具体反演算法请参考李正强等(2015)和 Li et al(2013),也与 AERONET 算法近似,此处不再赘述。

寿县仪器于 2017 年在 SONET 工作组的帮助下完成仪器标定,采用了室内外传递定标方法(Li et al, 2008)确保数据的高精度(Li et al, 2018)。

## 2 结果和讨论

选择分析的测量时间是 2017 年全年,具体是:春季:2017 年 3—5 月,夏季:6—8 月,秋季:9—11 月,冬季:12 月至 2018 年 2 月。结果均是按测量数据按季节平均。

### 2.1 气溶胶光学厚度

AOD 计算波长分别为:0.34、0.38、0.44、0.5、0.67、0.87、0.937、1.02 和 1.64  $\mu\text{m}$ 。

图 1 中测量当地全年 AOD 数值相差不大,一年四季同一波长对应的最大值和最小值差距基本在 0.1 之间。春季 AOD 最高,夏、秋季最为接近,也最低,冬季介于它们之间,可见相比另外两个季节,夏、秋季空气质量相对最好,可能是由于没有强冷空气,不会带来太多污染物输入,这两个季节气候特点也的确利于污染物扩散,不利于聚集,并且夏、秋季观

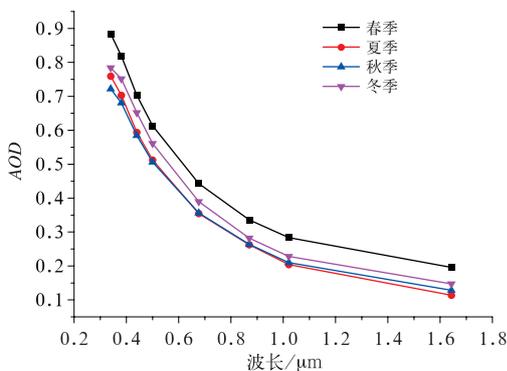


图 1 2017 年寿县 AOD 谱季节分布特征

Fig. 1 Seasonal features of AOD size distribution for Shou County in 2017

测点附近基本没有燃烧。冬季受到雾-霾影响 AOD 数值高于夏、秋季。

利用 HYSPLIT 模式对气溶胶来源分析结果表明,全年江淮之间主要受到三类气团的影响,在春季有其中两类发生。来自西北大陆气团背景下爱根核模态粒子在经过大陆的长距离输送过程后,老化程度较高,吸湿性也更强;而对于积聚模态粒子,则为来自东方气团的粒子吸湿性更强,强吸湿模态粒子数目比例也较高(牟福生等, 2016; Zhuang et al, 2018)。这也是导致当地春季 AOD 数值偏高的可能原因。

表 1 是在 0.44  $\mu\text{m}$  处的细模式气溶胶光学厚度(AOD<sub>f</sub>)和光学厚度细粒子比(FMF, FMF = AOD<sub>f</sub>/AOD)结果。寿县一年四季 FMF 变化不大,以细粒子模式气溶胶为主(FMF 均大于 0.80),而且和其他季节相比,春季 FMF 数值相对较小,说明春季气溶胶粒子比夏、秋和冬季稍大(见 2.2 节、2.3 节和 2.4.2 节结果)。

表 1 2017 年寿县细模式气溶胶光学厚度(AOD<sub>f</sub>, 0.44  $\mu\text{m}$ )和光学厚度细粒子比(FMF, 0.44  $\mu\text{m}$ )

Table 1 Fine mode aerosol optical depth (AOD<sub>f</sub>) and fine mode fraction in optical depth (FMF) at 0.44  $\mu\text{m}$  in Shou County in each season of 2017

季节	AOD <sub>f</sub>	FMF
春季	0.71	0.82
夏季	0.61	0.90
秋季	0.62	0.87
冬季	0.67	0.89

### 2.2 埃斯特朗指数

从统计上看(图 2),一年四季大部分 AE 数据集中在 0.9~1.5,说明当地以细模态粒子为主。在箱式图框中,春季 AE 的中位值和均值都最低,说明从平均来看春季相对其他季节气溶胶粒子稍大。春季气溶胶主要来自西北较强的爱根核模态粒子长距离输送,以及东方气团粒子的贡献(2.1 节)。AE 的中位值和均值大小顺序和表 1 中 FMF 数值排序一致。在冬季,细模态粒子主要是由雾-霾污染造成的。

### 2.3 体积谱分布

气溶胶 VSD( $dV/d\ln r$ , 单位:  $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )是表征气溶胶特性的物理参数,是指单位面积上垂直大气

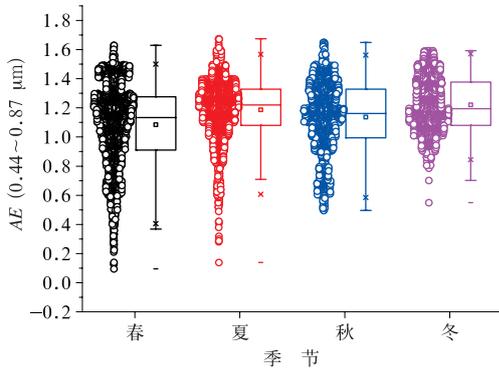


图 2 2017 年寿县 AE 统计箱式结果

(小正方形和直线分别表示平均值和中位值,最高和最低的短线分别表示了最大和最小值,十字架之间表示 1%~99% 数值范围;箱子的线条由下至上分别表示下四分位值、中位值和上四分位值;大于上四分位值 1.5 倍四分位数差的值,或者小于下四分位值 1.5 倍四分位数差的值,被划为异常值;异常值之外,在最靠近上边缘和下边缘的两个值处画横线,作为箱式图的触须)

Fig. 2 Ångström exponent indices statistical box chart for Shouxian County in 2017

(The small squares and lines crossing in the box respectively denote mean and median values, the top and bottom short lines indicate maximum and minimum values, and the crosses denote the 1%–99% range; the box lines represent the lower quartile, median and upper quartile values; the value great than 1.5 times of the interquartile range or value less than 1.5 times of the interquartile range is classified as abnormal value)

柱内单位半径范围内的气溶胶粒子的体积随粒径分布情况,即:单位体积空气中所含一定尺度范围内物质颗粒的体积浓度,与大气颗粒物的质量浓度谱有类似的结构形态,一定程度上反映大气质量浓度谱的变化(Xie et al, 2015; 阎逢旗等, 2013)。总体积浓度(TVC, 单位:  $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ), 是粗模态体积浓度和细模态体积浓度之和;细模态体积比(VFMF), 是细模态体积浓度和总体积浓度之比。

由图 3 可见,一年四季的气溶胶体积谱分布基本相似,均为在  $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$  处出现最高值,峰值接近,然后在  $0.7\ \mu\text{m}$  左右陡然下降到波谷,在  $2\sim 5\ \mu\text{m}$  处再次上升到极大值,然后随着体积半径的增加逐渐减少,说明气溶胶粒子大小对应不同的浓度在一年四季变化性质基本上接近,气溶胶粒子半径主要集中在  $0.1\sim 0.4$  和  $2\sim 7\ \mu\text{m}$ ,所有季节都是粗细模态混合谱分布,即便在细模态占主导的污染季节(例如冬季);计算半径大于  $0.8\ \mu\text{m}$  的曲线包含面积结果,春季:0.404,夏季:0.371,秋季:0.375,冬

季:0.373,说明观测期间内春季粗粒子浓度高于其他三个季节,与之前分析一致,与表 1 中 FFMF 数值对应的四季顺序相反。四季 VFMF 数值接近,在 0.50 左右,说明一年四季细粒子所占的气溶胶体积比例相差不大。

而且气溶胶粒径谱具有典型的双峰分布,图 3 中显示谱分布以  $0.8\ \mu\text{m}$  为中心基本对称,说明一年四季粗细模态粒子区分半径尺度是  $0.8\ \mu\text{m}$ ,也说明了粗细模态粒子体积比基本接近,如表 2 中 VFMF 数值(0.5 左右)。春季体积谱分布在  $0.6\sim 3\ \mu\text{m}$  明显高于其他三个季节,说明相比其他三个季节,春季粒子半径主要集中在  $3\ \mu\text{m}$  之前。过了  $3\ \mu\text{m}$ ,夏、秋和冬季数值超过春季,春季的体积谱分布迅速减少为最小(但四季的体积谱分布也接近),说明在这三个季节,半径超过  $3\ \mu\text{m}$  的大粒子贡献超过了春季,而且半径越大,气溶胶体积谱分布越接近。且一年四季 TVC 数值在 0.20 左右,基本接近,这点和 AOD 一年四季数值也接近的性质一致。

寿县距东南方的合肥和西北方的阜阳均不到 100 km(合肥与阜阳人口均在 1000 万左右,还在进行城市大建设),距离东北方向的淮南仅 20 km,而距离同样方向再远一点的蚌埠也不到 70 km(两城市人口均超过 300 万)。寿县在地理上属于季风盛行区,所以不论冬季刮西北风、东北风,还是夏季刮东南风,均会受到大量细模态粒子的影响。

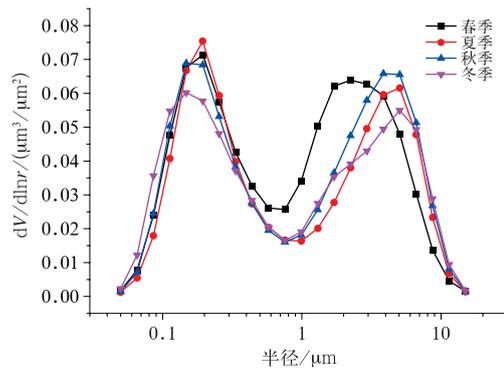


图 3 2017 年寿县体积谱季节分布特征

Fig. 3 Seasonal features of volume size distributions for Shouxian County in 2017

## 2.4 气溶胶复折射率指数

ACRI 计算的波长是:  $0.44$ 、 $0.675$ 、 $0.87$  和  $1.02\ \mu\text{m}$ 。ACRI 用于描述整层大气气溶胶的散射

和吸收特性,是影响短波辐射平衡和气候变化评估的重要参数,准确获得 ACRI,对降低气溶胶引起的气候变化评估不确定性有重要意义。

表2 2017年寿县总体积浓度和细粒子体积比  
Table 2 Total volume concentration (TVC) and fine mode fraction in volume (VFMF) in Shouxian County in each season of 2017

季节	TVC/( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ )	VFMF
春季	0.226 75	0.455 8
夏季	0.196 45	0.507 4
秋季	0.211 86	0.471 2
冬季	0.198 54	0.502 2

#### 2.4.1 气溶胶折射率实部

气溶胶折射率实部是反映气溶胶散射效应的因子,数值越大,说明散射效应越明显。由图4a中气溶胶折射率实部季节性的差异分析可见,一年四季实部从大到小顺序分别是:冬、春、秋和夏季。这个归结于不同大气状况对应的气溶胶水分含量,实部折射率在一定程度上反映的是气溶胶吸湿特性对散射的影响(Schuster et al, 2009)。夏季水汽含量充足,则具有低的实部,而冬季天气相比较干燥,则实部偏大。干燥粒子(一般分布在1.45~1.70)的实部比含水高的粒子实部(1.33)要高得多(Schuster et al, 2009)。寿县当地气候既不是非常干燥,也不是非常湿润,一年四季实部折射率也就是在干燥粒子实部下限(1.42~1.50)。此外,实部变化与光谱波长没有明显关系(Wang et al, 2013),例如一年四季实部平均值分别是1.487、1.44、1.46和1.49,实部四季随波长的变化差异不大。

#### 2.4.2 气溶胶折射率虚部

气溶胶折射率虚部反映的是气溶胶吸收效应的因子,数值越大则气溶胶吸收越强。由图4b可以看到,全年数值在0.02之下。同样也可以看出季节上的差异,相比于夏、秋和冬季,春季数值偏小,是其他三季的1/3~1/2,说明相比其他三个季节,粗模态粒子相对较多,导致气溶胶吸收下降,结果同第2.1和2.2节。将夏、秋和冬季明显偏高部分归结于来自外部输入和附近人工源的细小、吸收的粒子存在,例如黑炭,从表1和表2也可以看到这三个季节较高比例的细小粒子,且季节性虚部大小排序,和表中所示顺序一致,寿县周边人口达百万级以上且在建设的大城市有几个,如2.3节所述,造成细小、吸收粒子的大量贡献。Zhuang et al(2018)发现在西长三角区域测量气溶胶,有近1/3测量时间是黑炭占主体的气溶胶类型。除此之外,测量站点周边有农户居住,且正西方约300 m是省道,平时车辆来往频繁,尾气排放对一些主要吸收成分来源也有贡献(如黑炭)。

从图4b还看出气溶胶折射率虚部随波长变化情况(Wang et al, 2013)。如冬季虚部明显地变化,0.44~0.675  $\mu\text{m}$ ,虚部是随着波长增加而减少的,而0.675~1.02  $\mu\text{m}$ ,虚部随着波长增加而增加,0.44  $\mu\text{m}$ 虚部值大于0.675  $\mu\text{m}$ 的,说明短波吸收增加。这个可能是由于棕色碳导致在短波区域吸收的增加(Bahadur et al, 2012),是在低温下碳的不完全燃烧过程产生的(Xie et al, 2014; Feng et al, 2013)。测量地点冬季通过燃烧煤炭及木材取暖做饭,这也许就是冬季气溶胶折射率虚部开始在短波偏大的原因。

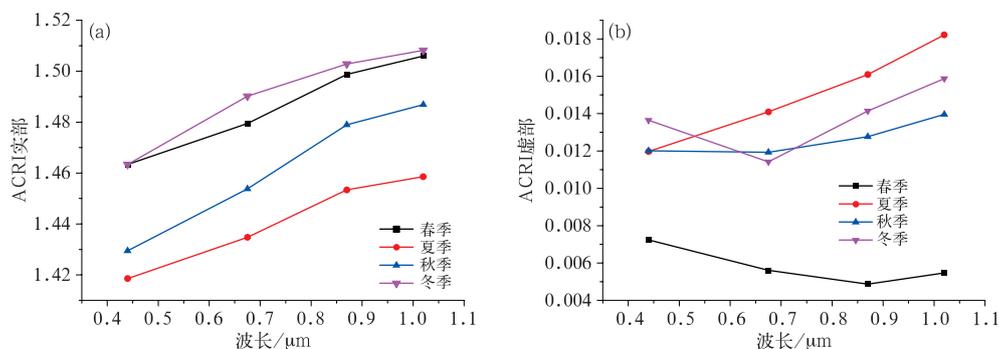


图4 2017年寿县 ACRI 实部(a)和虚部(b)季节分布特征

Fig. 4 Seasonal distribution feature of real (a) and imaginary (b) refractive indices for Shouxian County in 2017

## 2.5 单次散射反照率

SSA 计算的波长是: 0.44、0.675、0.87 和 1.02  $\mu\text{m}$ 。SSA 表示一次散射过程中散射光强在整个削弱光强过程中所占的比例,即:散射与消光系数之比。它反映了大气散射和吸收特性,其值越大,则大气的散射性越强;其值越小,则大气的吸收性越强。在给定的波长下,单次散射反照率也可以表示为气溶胶散射光学厚度与气溶胶总光学厚度的比值,其值很大程度上依赖于气溶胶成分和混合相态。

由图 5 可见,全年 SSA 均在 80% 以上,说明总体上气溶胶散射占消光比例很大,测量当地散射较强。春季数值最大,是之前分析的受到外来输入影响较明显造成,这也归结于散射气溶胶和复杂的混合相态,与第 2.1~2.3 节、2.4.2 节和表 1(FMF 数值最小)、表 2(VFMF 数值最小)结果一致。

从数值大小看,春季 SSA 数值最大,夏季 SSA 数值最小,秋、季在两者之间,与图 4 气溶胶折射率虚部对应的四季顺序相反。春季单次散射反照率随着波长增加而先增加后减少。单次散射率随波长的增大而增大,因为这个季节气溶胶多是外来输入爱根核模态和积聚模态粒子(如 2.1 节)。它们的半径随着相对湿度的增大而增加,同时导致细模态粒子的增长和凝聚,形成一定数量的粗模态粒子,所以相比其他三个季节,春季粗模态粒子占的比重比较大,最终光散射系数增长,散射消光作用较强,导致 SSA 数值偏大;而从 0.87  $\mu\text{m}$  后单次散射反照率开始减小,应该是到了近红外,相比可见光波段散射下降造成。

在细模态粒子占主导作用的情况下,随着波长的增长,单次散射反照率越小,如图 5 夏、秋和冬季所示,说明粒子的散射效果越来越弱。由波长与粒

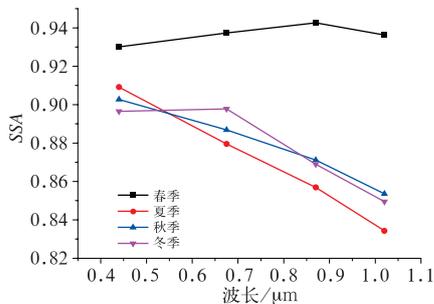


图 5 2017 年寿县 SSA 季节分布特征

Fig. 5 Seasonal distribution feature of single scattering albedo (SSA) for Shouxian County in 2017

子尺度相类似时,散射光最有效,波长大于粒子尺度很多时,散射效果最差可知,此状况是细粒子占主导成分的气溶胶粒子。夏季数值最小,说明吸收相对最强,与图 4 结果一致。

## 2.6 球形粒子百分比

PSP 是研究气溶胶球形粒子所占比例大小,可以被理解为是气溶胶成分和混合状态的反映。粗模态粒子一般认为有非球形特征,具有低的 PSP,例如沙尘,它经常具有复杂形状,并且是大尺度微粒;而高的 PSP 数值对应的是细模态气溶胶成分,例如生物质燃烧产生的碳和无机粒子以及相关污染物,一般都认为是球形粒子,这种粒子对于颗粒物形状分布并不敏感(Dubovik et al, 2006; Martins et al, 1998)。一般认为气溶胶水吸收是影响 PSP 一个重要因子,因为当相对湿度很高时,它既影响气溶胶内部混合状态,又影响粒子表面形态(Xie et al, 2014; 2015; Lesins et al, 2002)。

图 6 中纵坐标为 PSP 概率分布,表示不同气溶胶相态占总气溶胶量的概率。由图可以看到,全年低于 20% 的 PSP 占超过一半比例,说明在一年四季中,非球形粒子占主要支配地位,气溶胶散射效应强,与 2.5 节一致;春季有近 80% 的测量结果为非球形粒子,在一年四季是最高的,说明外来输入影响比较明显,与第 2.1 节、2.2 节、2.3 节、2.4.2 节和 2.5 节结果一致;而在夏、冬季较高的 PSP 概率分布数值相比春、秋季有所提高,说明夏季湿润空气不同气溶胶类型带来的球形或者小粒子,而冬季由于雾-霾

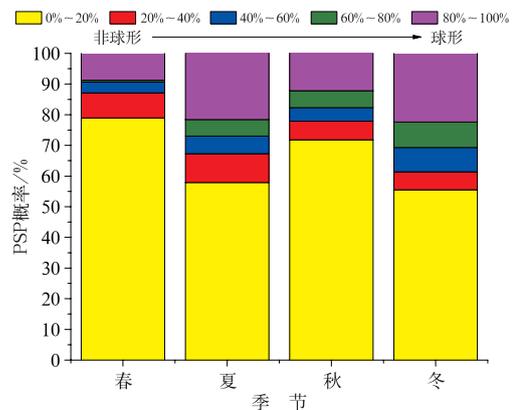


图 6 2017 年寿县 PSP 概率季节分布特征

Fig. 6 Seasonal distribution feature of probability distribution of the percentage of spherical particles (PSP) for Shouxian County in 2017

频发污染加重,这两个季节均会带来细模态粒子含量增加(见表1的FMF和表2中VFMF)。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文利用地基遥感探测仪器太阳-天空辐射计CE318,对中国气象局寿县国家气候观象台当地气溶胶光学和微物理特性进行了测量和详细分析。通过对2017年全年测量结果,反演了气溶胶相关特性,包括:AOD、AE、VSD、ACRI(实部和虚部)、SSA和PSP。

乡村型并受到外来输入和一定人类活动影响的当地气溶胶光学和微物理特性的研究结论如下。

(1) 春季AOD最高,夏、秋季最为接近,也最低,冬季介于之间。说明夏、秋季空气质量相对较好。

(2) 一年四季大部分AE数据都集中在0.9~1.5,说明当地以细模态粒子为主。春季相对其他季节,气溶胶粗模态相对较多。

(3) 四季的VSD基本相似;全年气溶胶粒子半径主要集中在0.1~0.4和2~7 $\mu\text{m}$ ,说明当地气溶胶既有细模态粒子,也有粗模态粒子,具有典型对称结构;0.8 $\mu\text{m}$ 是粗细模态粒子区分半径尺度;春季粗粒子数量最多,且半径集中在3 $\mu\text{m}$ 之前;在夏、秋、冬季,半径超过3 $\mu\text{m}$ 的大粒子贡献超过春季。

(4) 夏季ACRI实部最小,说明当地夏季水汽含量最大;实部变化与光谱波长没有明显关系。从ACRI虚部来看,春季数值偏小,说明粗模态粒子较多;ACRI虚部随波长变化而变化。

(5) 一年四季,SSA均在80%以上,总体上气溶胶散射占消光比例很大。随着波长的增加,春季数值最大,说明春季粗模态粒子相对较多;其余三个季节SSA都是随着波长增加而逐步减少。

(6) 从PSP可以看出,在一年四季中非球形粒子占主要支配地位且春季含量最高;夏、冬季较高的PSP所占测量结果比例相比春、秋季有所提高。

#### 3.2 讨论

比较可见,因寿县特殊地理位置(属乡村型气溶胶模式,但也受到一定人为和外来输入影响),其气溶胶光学及微物理特性有着一定的特殊性。选择北京、张掖、民勤和舟山,分别代表受工业污染严重城

市型、乡村型、沙尘型和海洋型气溶胶模式结果,和寿县进行比对分析(Xie et al, 2015):随着波长增加,其AOD一般低于北京,而高于张掖和民勤,接近舟山;AE数值与北京和舟山接近,在0.8~1.2,高于张掖和民勤,基本以小粒子为主;当地是乡村型气溶胶模式,体积谱分布数值与张掖的测量结果接近,但小粒子数量小于张掖,应该还是受到一些人为和外来输入影响,低于北京;折射率虚部数值与张掖也接近,但低于北京和民勤,大于舟山;SSA数值低于舟山,比较接近其他三种气溶胶模式,因为海洋型气溶胶模式粗粒子模态所占比重较大(Omar et al, 2005; Dubovik et al, 2002; Smirnov et al, 2002),散射明显;当地一年四季以非球形粒子为主,除舟山之外,寿县与其他三地的PSP结果接近。

此外,比较发现:寿县测量0.44 $\mu\text{m}$ 对应的AOD在一年四季平均略低于0.7,而AE绝大部分在1以上,与同一区域——长三角研究结果基本相似(Pan et al, 2010)。在与山区测量结果比较可见,寿县当地AOD对应于0.55 $\mu\text{m}$ 在0.4~0.6,我国中部嵩山山区气溶胶AOD在0.5~0.7(Ma et al, 2016),说明寿县受污染比嵩山较轻。东北龙凤山(Wang et al, 2010)当地AOD对应于0.44 $\mu\text{m}$ 处在0.5~0.75,寿县则为0.55~0.7,两地基本接近,而一年四季AOD大小排列,寿县、嵩山和龙凤山均为春季高、秋季低;龙凤山主要受雾-霾和沙尘影响,沙尘影响时AE经常在0.10~1.0,寿县无沙尘影响,AE大部分集中在1.0之上,而龙凤山受雾-霾影响时,AE则在1.4左右,略高于寿县结果。

与东北四座城市(沈阳、鞍山、本溪和抚顺)的测量结果比较(Che et al, 2015),一年四季AOD寿县和它们大小排列顺序接近,均为春季高、秋季低,且寿县测量结果低于它们,说明污染相比较轻;东北四城市AE春季低冬季高,这点和寿县也一致;东北四城市0.44 $\mu\text{m}$ 处的SSA在0.81~0.87,略低于寿县,说明气溶胶散射效应低于寿县;这四座城市春季也有沙尘影响,造成粗模态粒子增加,而寿县是春季受输入气溶胶影响,导致粗模态粒子相对其他三个季节较多,四座东北城市夏季细模态粒子占主体,秋、冬季则是混合型,而寿县以细粒子模态为主。

气溶胶光学和微物理特性主要是由成分和混合相态决定。我们研究的结论总体上与其他研究相似,但是部分也有出入,主要是与一些因素有关,如特定气候条件(干湿大气、降水和季风)、附近自然源,最重要的是无所不在的人为源(农业和交通,人

口数量及城市建设)。这些对当地气溶胶特征都有着明显的影响。总体上本研究可以体现这一区域的气溶胶类型特性,也可以为淮河流域中部地区气溶胶研究做参考。

**致谢:**衷心感谢中国科学院遥感与数字地球研究所国家环境保护卫星遥感重点实验室(李正强课题组)在数据反演处理和标定工作的指导和帮助。

## 参考文献

- 陈然,江洪,肖冲涛,等,2008.地基遥感监测杭州地区气溶胶光学特性及大气环境变化[J].环境科学研究,21(3):22-26. Chen R, Jiang H, Xiao Z Y, et al, 2008. Monitoring aerosol optical properties using ground based remote sensing and the change of atmospheric environment in Hangzhou Region[J]. Res Environ Sci, 21(3):22-26(in Chinese).
- 范伟,韩永,王毅,等,2006a.内陆和沿海地区大气气溶胶标高的测量分析[J].红外与激光工程,35(5):532-535. Fan W, Han Y, Wang Y, et al, 2006a. Analysis on aerosol scale height measured at inland and coastal zone[J]. Infrared Laser Eng, 35(5):532-535(in Chinese).
- 范伟,王毅,饶瑞中,2006b.可见近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究[J].光子学报,35(3):402-407. Fan W, Wang Y, Rao R Z, 2006b. Measurement of the atmospheric transmittance from visible to near infrared bands[J]. Acta Photon Sin, 35(3):402-407(in Chinese).
- 古明媚,张涛,2016.电白雷暴气候特征及演变分析[J].气候研究与应用,37(2):103-110. Gu M M, Zhang T, 2016. Climate characteristics and variation of thunderstorm in Dianbai[J]. J Meteor Res Appl, 37(2):103-110(in Chinese).
- 胡方超,张兵,陈正超,等,2007.利用太阳光度计 CE318 反演气溶胶光学厚度改进算法的研究[J].光学技术,33(s1):38-41, 43. Hu F C, Zhang B, Chen Z C, et al, 2007. Improved algorithm for the retrieval of aerosol optical depth using the sunphotometer CE318 [J]. Opt Tech, 33(s1):38-41, 43(in Chinese).
- 李正强,李东辉,李凯涛,等,2015.扩展多波长偏振测量的太阳一天空辐射计观测网[J].遥感学报,19(3):495-519. Li Z Q, Li D H, Li K T, et al, 2015. Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements [J]. J Remote Sens, 19(3):495-519(in Chinese).
- 林伟立,徐晓斌,于大江,等,2009.龙凤山区域大气本底台站反应性气体观测质量控制[J].气象,35(11):93-100. Lin W L, Xu X B, Yu D J, et al, 2009. Quality control for reactive gases observation at Longfengshan regional atmospheric background monitoring station[J]. Meteor Mon, 35(11):93-100(in Chinese).
- 刘潇,王成刚,黄辉军,2017.2012年南海夏季风活跃期与非活跃期广东电白地区海陆大气边界层特征分析[J].热带气象学报,33(1):93-103. Liu X, Wang C G, Huang H J, 2017. Analysis of the characteristics of the land-sea boundary layer over the Dianbai Area during the active and inactive periods of South China Sea summer monsoon in 2012[J]. J Trop Meteor, 33(1):93-103(in Chinese).
- 刘玉杰,牛生杰,郑有飞,2004.用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J].南京气象学院学报,27(5):615-622. Liu Y J, Niu S J, Zheng Y F, 2004. Optical depth characteristics of Yinchuan atmospheric aerosols based on the CE-318 sun tracking spectrophotometer data[J]. J Nanjing Inst Meteor, 27(5):615-622(in Chinese).
- 牟福生,李昂,谢品华,等,2016.利用 CE318 太阳光度计资料反演合肥气溶胶光学特性[J].红外与激光工程,45(2):0211003. Mou F S, Li A, Xie P H, et al, 2016. Retrieval of aerosol optical properties at Hefei by sun-photometer CE318 data[J]. Infrared Laser Eng, 45(2):0211003 (in Chinese).
- 宋广宁,杨小银,付培健,2013.兰州市大气气溶胶的太阳光度计观测分析[J].兰州大学学报(自然科学版),49(4):470-473, 482. Song G N, Yang X Y, Fu P J, 2013. Aerosol optical parameter observations in Lanzhou City[J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 49(4):470-473, 482(in Chinese).
- 田磊,张武,史晋森,等,2010.河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J].高原气象,29(4):1050-1057. Tian L, Zhang W, Shi J S, et al, 2010. A preliminary study on scattering property of dust aerosol in Hexi Corridor[J]. Plateau Meteor, 29(4):1050-1057(in Chinese).
- 王慧,李栋梁,2010.西北干旱区常规气象站与野外试验站观测的气象要素的对比分析[J].高原气象,29(2):514-522. Wang H, Li D L, 2010. Differences of meteorological elements that conventional meteorological and field stations observed in northwest dry area of China[J]. Plateau Meteor, 29(2):514-522 (in Chinese).
- 徐安伦,钟爱华,孙绩华,等,2016.大理地区对流层至低平流层大气垂直结构的特征分析[J].高原气象,35(1):77-85. Xu A L, Zhong A H, Sun J H, et al, 2016. Vertical structure characteristic from troposphere to low stratosphere in Dali Region over the southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 35(1):77-85(in Chinese).
- 阎逢旗,宋怀荣,郭祺,等,2013.北京市大气气溶胶体积谱特性分析[J].中国海洋大学学报,43(9):112-116. Yan F Q, Song H R, Guo Q, et al, 2013. Analysis of atmospheric aerosol volume distribution in Beijing[J]. Periodical Ocean Univ China, 43(9):112-116(in Chinese).
- 杨志峰,张小曳,车慧正,等,2008. CE318 型太阳光度计标定方法初探[J].应用气象学报,19(3):297-306. Yang Z F, Zhang X Y, Che H Z, et al, 2008. An introductory study on the calibration of CE318 sunphotometer[J]. J Appl Meteor Sci, 19(3):297-306(in Chinese).
- 张琳娜,郭锐,2014.2012年冬季北京三种高影响天气的关联与成因分析[J].气象,40(5):598-604. Zhang L N, Guo R, 2014. Analyses on relationship and causes for the three high-influence weather events in Beijing in winter 2012[J]. Meteor Mon, 40(5):598-604(in Chinese).
- 张兴赢,张鹏,廖宏,等,2009.地基傅立叶红外高光谱遥感观测大气成分平台建设及其反演技术研究[J].气象,35(1):9-17. Zhang X Y, Zhang P, Liao H, et al, 2009. On ground-based remote sensing for atmospheric species by FTIR instrument and retrieval algorithm[J]. Meteor Mon, 35(1):9-17(in Chinese).
- 张玉香,胡秀清,刘玉洁,等,2002.北京地区大气气溶胶光学特性监

- 测研究[J]. 应用气象学报, 13(s1): 136-143. Zhang Y X, Hu X Q, Liu Y J, et al, 2002. Measurement of atmospheric aerosol optical characteristics in Beijing urban area[J]. J Appl Meteor Sci, 13(s1): 136-143(in Chinese).
- 中国气象局, 2010. CE318 太阳光度计观测规范[M]. 北京: 中国气象局; 1-2. China Meteorological Administration, 2010. Rules for CE318 sunphotometer measurement[M]. Beijing: China Meteorological Administration; 1-2(in Chinese).
- 中国气象局监测网络司, 2010. CE318 太阳光度计技术手册[M]. 北京: 中国气象局监测网络司; 1-17. Monitoring Network Department, China Meteorological Administration, 2010. CE318 solar-sky radiometer technical manual[M]. Beijing: Monitoring Network Department, China Meteorological Administration; 1-17(in Chinese).
- 周旭, 2016. 中国西北地区沙空气溶胶及其对气象场的影响[D]. 兰州: 兰州大学. Zhou X, 2016. Dust aerosol and its effects on the meteorological fields in Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- Bahadur R, Praveen P S, Xu Y Y, et al, 2012. Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 109(43): 17366-17371.
- Che H Z, Shi G Y, Uchiyama A, et al, 2008. Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China[J]. Atmos Chem Phys, 8(3): 3199-3214.
- Che H Z, Zhao H J, Wu Y F, et al, 2015. Analyses of aerosol optical properties and direct radiative forcing over urban and industrial regions in Northeast China[J]. Meteor Atmos Phys, 127(3): 345-354.
- Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al, 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations[J]. J Atmos Sci, 59(3): 590-608.
- Dubovik O, Sinyuk A, Lapyonok T, et al, 2006. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust[J]. J Geophys Res Atmos, 111(D11): D11208.
- Feng Y, Ramanathan V, Kotamarthi V R, 2013. Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation? [J]. Atmos Chem Phys, 13(17): 8607-8621.
- Lesins G, Chylek P, Lohmann U, 2002. A study of internal and external mixing scenarios and its effect on aerosol optical properties and direct radiative forcing[J]. J Geophys Res Atmos, 107(D10): AAC 5-1-AAC 5-12.
- Li Z Q, Blarel L, Podvin T, et al, 2008. Transferring the calibration of direct solar irradiance to diffuse-sky radiance measurements for CIMEL sun-sky radiometers[J]. Appl Opt, 47(10): 1368-1377.
- Li Z Q, Gu X F, Wang L, et al, 2013. Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter[J]. Atmos Chem Phys, 13(20): 10171-10183.
- Li Z Q, Li L, Zhang F X, et al, 2015. Comparison of aerosol properties over Beijing and Kanpur: optical, physical properties and aerosol component composition retrieved from 12 years ground-based sun-sky radiometer remote sensing data[J]. J Geophys Res Atmos, 120(4): 1520-1535.
- Li Z Q, Xu H, Li K T, et al, 2018. Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: an overview of sun-sky radiometer observation network (SONET) measurements[J]. Bull Am Meteor Soc, 99(4): 739-755.
- Ma Y, Li Z Q, Li Z Z, et al, 2016. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over mountains in Central China based on a sun-sky radiometer site of SONET[J]. Remote Sens, 8(2): 111.
- Martins J V, Artaxo P, Lioussé C, et al, 1998. Effects of black carbon content, particle size, and mixing on light absorption by aerosols from biomass burning in Brazil[J]. J Geophys Res Atmos, 103(D24): 32041-32050.
- Omar A H, Won J G, Winker D M, et al, 2005. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements[J]. J Geophys Res Atmos, 110(D10): D10S14.
- Pan L, Che H Z, Geng F H, et al, 2010. Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region[J]. Atmos Environ, 44(21/22): 2587-2596.
- Salinas S V, Chew B N, Liew S C, 2009. Retrievals of aerosol optical depth and Ångström exponent from ground-based sun-photometer data of Singapore[J]. Appl Opt, 48(8): 1473-1484.
- Schuster G L, Lin B, Dubovik O, 2009. Remote sensing of aerosol water uptake[J]. Geophys Res Lett, 36(3): L03814.
- Smirnov A, Holben B N, Kaufman Y J, et al, 2002. Optical properties of atmospheric aerosol in maritime environments[J]. J Atmos Sci, 59(3): 501-523.
- Wang L, Li Z Q, Tian Q J, et al, 2013. Estimate of aerosol absorbing components of black carbon, brown carbon, and dust from ground-based remote sensing data of sun-sky radiometers[J]. J Geophys Res Atmos, 118(12): 6534-6543.
- Wang P, Che H Z, Zhang X C, et al, 2010. Aerosol optical properties of regional background atmosphere in Northeast China[J]. Atmos Environ, 44(35): 4404-4412.
- Xie Y S, Li Z Q, Li D H, et al, 2015. Aerosol optical and microphysical properties of four typical sites of SONET in China based on remote sensing measurements[J]. Remote Sens, 7(8): 9928-9953.
- Xie Y S, Li Z Q, Li L, et al, 2014. Study on influence of different mixing rules on the aerosol components retrieval from ground-based remote sensing measurements[J]. Atmos Res, 145/146: 267-278.
- Zhuang B L, Wang T J, Liu J, et al, 2018. The optical properties, physical properties and direct radiative forcing of urban columnar aerosols in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmos Chem Phys, 18(2): 1419-1936.