

激光与光电子学进展

中国东部地区气溶胶光学特性和类型特性分析

韩亚芳^{1,2}, 马骥^{3*}, 刘焱春^{1,2}, 来庆广^{1,2}¹青岛地质工程勘察院(青岛地质调查开发局), 山东 青岛 266101;²自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 山东 青岛 266101;³青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266033

摘要 本文基于我国东部海岸线分布的 Beijing-RADI、Beijing-CAMS、Xuzhou-CUMT、Taihu、Hong_Kong_PolyU、Hong_Kong_Sheung 六个 AERONET 长期观测站点的光学厚度(AOD)、Angstrom 指数(AE)、单次散射反照率(SSA)、细粒子百分比(FMF)四种气溶胶的物理光学特性观测产品,结合 Terra/Aqua MODIS Level2 C6 AOD 产品,研究了我国东部地区气溶胶时空变化特性及类型特性。研究表明:1)北京、徐州、太湖、香港四个地区地基的 AOD 年均值徐州>太湖>北京>香港,依次为 0.805 ± 0.129 、 0.775 ± 0.069 、 0.664 ± 0.197 、 0.519 ± 0.125 ;2)在 AERONET 站点处,MODIS AOD 年均值检测值太湖>徐州>香港>北京,依次为 0.902 ± 0.227 、 0.772 ± 0.082 、 0.547 ± 0.064 、 0.517 ± 0.234 ,与地基检测值依次相差 22.2%、4.1%、5.5%、16.3%;3)AE 年均值香港>太湖>徐州>北京,依次为 1.314 ± 0.054 、 1.213 ± 0.084 、 1.198 ± 0.104 、 1.118 ± 0.078 ,表明中国东部地区污染物的粒径从北往南逐渐减小;4)北京、徐州、太湖、香港四个地区均以弱吸收型细粒子所占比重最大,依次为 38.29%、44.99%、44.30%、48.14%,中度吸收型细粒子和强散射细粒子次之,其他类型的粒子均较少。

关键词 大气光学与海洋光学;气溶胶;气溶胶光学厚度;Angstrom 指数;单次散射反照率;细粒子百分比

中图分类号 X513

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221323

Analysis of Optical Characteristics and Type Characteristics of Aerosols in Eastern China

Han Yafang^{1,2}, Ma Su^{3*}, Liu Yanchun^{1,2}, Lai Qingguang^{1,2}¹Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute (Qingdao Geological Exploration Development Bureau),
Qingdao 266101, Shandong, China;²Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources,
Qingdao 266101, Shandong, China;³Qingdao Surveying & Mapping Institute, Qingdao 266033, Shandong, China

Abstract The aerosol optical depth (AOD), Angstrom exponent (AE), single scattering albedo (SSA), and fine mode fraction (FMF) were extracted through six AERONET long-term observation sites, including Beijing-RADI, Beijing-CAMS, Xuzhou-CUMT, Taihu, Hong_Kong_PolyU, and Hong_Kong_Sheung locating along the coastline of eastern China, and were processed using the Terra/Aqua MODIS level2 C6 AOD products to study the aerosol variation characteristics and type characteristics of aerosols in eastern China. It is found that 1) the annual average value of AOD decreases from Xuzhou to Taihu, Beijing, and Hong Kong in the order 0.805 ± 0.129 , 0.775 ± 0.069 , 0.664 ± 0.197 , and 0.519 ± 0.125 , respectively; 2) at the AERONET site location, the annual average value of MODIS AOD decreases from Taihu to Xuzhou, Hong Kong, and Beijing in the order 0.902 ± 0.227 , 0.772 ± 0.082 , 0.547 ± 0.064 , and 0.517 ± 0.234 and the ground detection differences are 22.2%, 4.1%, 5.5%, and 16.3%, respectively; 3) the annual average AE value decreases from Hong Kong to Taihu, Xuzhou, and Beijing in the order 1.314 ± 0.054 , 1.213 ± 0.084 , 1.198 ± 0.104 , and 1.118 ± 0.078 , respectively, indicating that the average size of air pollutant particulates in eastern China decreases from north to south; 4) the proportions of weakly absorbable fine particles are 38.29%, 44.99%, 44.30%, and 48.14% in the four regions of Beijing, Xuzhou, Taihu, and Hong Kong, respectively, followed by

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-06-14; 录用日期: 2022-06-28; 网络首发日期: 2022-07-08

基金项目: 山东省地质矿产调查开发局科技攻关项目(KY202223)

通信作者: *16678548865@163.com

moderate absorption fine particles and strong scattering fine particles. Other types of particles are found in lower concentrations.

Key words atmospheric optics and ocean optics; aerosol; aerosol optical depth; Angstrom exponent; single scattering albedo; fine mode fraction

1 引言

大气气溶胶是悬浮于大气中固体、液体微粒与气载体共同组成的多项体系^[1],其在大气层中分布较广,生命周期相对较短,来源比较复杂,空间变化较大,化学组成复杂多样,对全球及区域变暗(dimming)^[2-3]、全球及区域性降水^[4]、大气辐射平衡^[5-6]、大气能见度变化^[7]、人体健康^[8]等都有着重大的影响。

目前,研究气溶胶的光学特性及时空分布主要有模式模拟、卫星遥感和地基遥感三种方式。通常模式模拟是通过排放清单估算气溶胶的区域变化和季节变化,该方式受排放清单精度及气溶胶物理化学变化过程模拟精度的影响,一般误差较大。卫星遥感可以获得连续性的空间数据,能够对大范围的气溶胶污染状况进行实时动态监测^[9],但因卫星获得的是地面反射辐射与大气散射辐射的混合信号,导致气溶胶特性的提取精度不高^[10]。地基遥感通过光谱、多角度、偏振等多种手段探测太阳直射和天空漫射辐射,从而提供高精度的气溶胶光学微物理特征参数,如本文用到的气溶胶光学厚度(AOD)、Angstrom指数(AE)、单次散射反照率(SSA)、细粒子百分比(FMF)等,为了解气溶胶特性及其时空变化规律提供了基础。

为提高对中国东部地区气溶胶类型及时空变化规律的认识,降低中国东部地区气溶胶气候变化效

应的不确定性,本文基于我国东部沿海岸线分布的 Beijing-RADI、Beijing-CAMS、Xuzhou-CUMT、Taihu、Hong_Kong_PolyU、Hong_Kong_Sheung 六个 AERONET 长期观测站点,提取自建站以来至 2016 年 9 月的 AOD、AE、SSA、FMF 四种气溶胶物理光学特性观测产品,研究了中国东部地区的气溶胶时空变化特性及类型特性,从而为研究中国东部地区空气质量污染相关因素、治理空气污染提供可靠的科学依据,也为进一步了解中国空气污染状况提供参考,对深入研究中国地区气溶胶对气候变化影响意义重大。

2 研究区域与资料选择

我国东部沿海岸线分布的 Beijing-RADI、Beijing-CAMS、Xuzhou-CUMT、Taihu、Hong_Kong_PolyU、Hong_Kong_Sheung 六个 AERONET 长期观测站点(观测日期多于 24 个月),分别在 2010 年 1 月、2012 年 8 月、2013 年 7 月、2005 年 9 月、2005 年 11 月、2012 年 2 月加入 AEAONET 观测网,本文采用了各观测站点加入 AEAONET 观测网以来至 2016 年 9 月的数据,并以 2 级数据为准,缺少 2 级数据的时间段则用 1.5 级数据作为补充,整理出中国东部地区的 AERONET 站点信息(表 1)。将同一城市有两个站点的取其均值作为该地区的真值,下文不再赘述。

表 1 AERONET 站点信息
Table1 Information of AERONET site

Area	Climatic condition	Station	Site	Observing session	Classified samples
Beijing	Temperate monsoon	Beijing-RADI	40.0N, 116.4E	201001-201609	679
		Beijing-CAMS	39.9N, 116.0E	201208-201609	
Xuzhou	Temperate monsoon	Xuzhou-CUMT	34.2N, 117.1E	201307-201609	469
Taihu	Subtropical monsoon	Taihu	31.4N, 120.2E	200509-201609	711
Hong Kong	Subtropical monsoon	Hong_Kong_PolyU	22.3N, 114.2E	200511-201510;201606-201609	376
		Hong_Kong_Sheung	22.5N, 114.1E	201202-201407;201410-201605	

3 AOD 时间序列及空间分布分析

3.1 AOD 时间序列分析

图 1 为北京、徐州、太湖、香港四个地区 AOD 年、季均值比较图,由图可知:1)四个地区 AOD 年均值徐州 > 太湖 > 北京 > 香港,依次为 0.805 ± 0.129 、 0.775 ± 0.069 、 0.664 ± 0.197 、 0.519 ± 0.125 ;2)徐州、太湖地区四季变化趋势完全一致,均为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季;3)北京地区为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬

季;3)香港地区为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季,显然不同于北京、徐州、太湖 AOD 夏季最大的特征,香港地区 AOD 夏季最小。为分析四个地区季节性差异,从世界天气网(<https://rp5.ru>)和历史天气网(<http://lishi.tianqi.com>)整理出 2011 年 2 月—2016 年 1 月 5 个整年度气象数据的季均值(表 2),发现:1)北京、徐州、太湖三个地区的湿度均为夏季最高,气溶胶的吸湿增长导致夏季 AOD 最大,冬季湿度较低,气溶胶干粒子难以吸湿增长,且冬季降雪有利于气溶胶粒子的沉降^[11],所

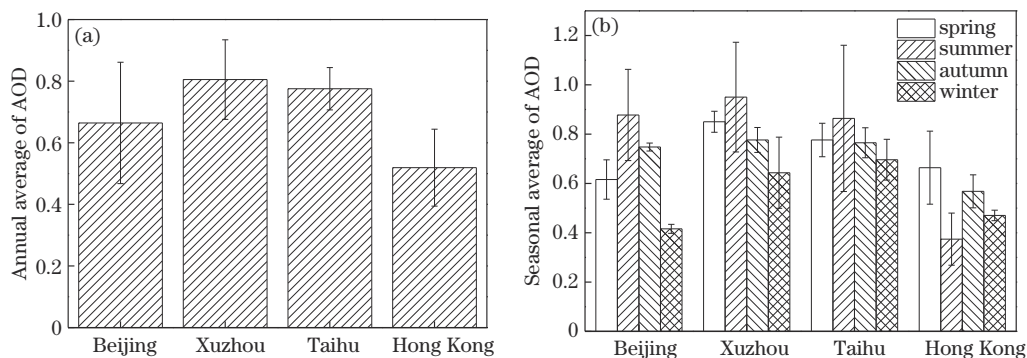


图1 AOD(a)年和(b)季均值变化

Fig. 1 Variations of (a) annual and (b) seasonal AOD averages

表2 气象数据年和季均值

Table 2 Annual and seasonal averages of meteorological data

	Spring			Summer			Autumn			Winter		
	Wind speed / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Humidity / %	Rain days / d	Wind speed / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Humidity / %	Rain days / d	Wind speed / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Humidity / %	Rain days / d	Wind speed / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Humidity / %	Rain days / d
Beijing	2.6	40.4	14.8	2.3	56.2	41.8	1.9	63.0	30.6	2.1	49.2	12.8
Xuzhou	2.1	57.0	23.8	2.0	66.2	35.0	1.5	72.2	34.8	1.6	66.2	21.0
Taihu	2.2	69.8	41.4	1.9	74.4	42.8	1.8	75.6	37.6	1.7	72.6	32.6
Hong Kong	4.2	84.0	32.4	4.9	90.0	62.6	4.8	81.0	45.2	4.7	74.8	21.4

以冬季 AOD 最小;2)香港地区夏季湿度最大,气溶胶粒子易吸湿增长,但其夏季降雨频繁,夏季降雨日达到 62.6 d,频繁的强降雨对气溶胶粒子的清除作用较好^[12],故其夏季 AOD 最低。而春季湿度较高,降雨日较少,且风速为四季最低,大气稳定度最强,较低的风速不利于气溶胶的扩散^[13],较强的大气稳定度下各种粒径尺度的粒子的干沉降速度最低^[14],使得春季 AOD 最大。

3.2 AOD 空间分布分析

为准确得到中国东部地区 AOD 空间分布情况,本文补充了 Terra 和 Aqua MODIS Level2 C6 AOD 产品、分辨率为 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 、2013 年 10 月—2016 年 9 月 MODIS AOD 在 AERONET 站点位置处四个地区的年均值变化。其中,为有效获取 AERONET 站点位置处 MODIS AOD 值,采用最邻近像元法和四像元均值法提取出 AERONET 站点位置处的 MODIS AOD 值,并统计出两种提取方法得到的 MODIS AOD 与地基 AOD 日均值的相关性(表 3)。由表 3 可知,提取 Beijing-RADI、Xuzhou-CUMT、Taihu、Hong_Kong_

Sheung 四个站点处的 MODIS AOD,最邻近像元法优于四像元均值法,而提取 Beijing-CAMS、Hong_Kong_PolyU 两个站点处的 MODIS AOD,四像元均值法优于最邻近像元法。

于是本文选取各站点所适用的最优方法获取相应站点处的 MODIS AOD 值,并整理出 AERONET 站点位置处四个地区 2013 年 10 月—2016 年 9 月 MODIS AOD 年、季均值变化(图 2)。

由图 2 可知:1)在 AERONET 站点处,MODIS AOD 年均值检测结果为太湖>徐州>香港>北京,依次为 0.902 ± 0.227 、 0.772 ± 0.082 、 0.547 ± 0.064 、 0.517 ± 0.234 ,与地基检测结果依次相差 22.2%、4.1%、5.5%、16.3%,显然,北京地区 MODIS AOD 年均值显著小于地基监测值,而太湖地区 MODIS AOD 年均值显著大于地基监测值,分析其原因为:1)MODIS AOD 采用暗目标/深蓝(DT/DB)融合算法生成,气溶胶模型选取误差通常是光学厚度反演的最大误差^[15-16],由下文可知,与其他地区相比,北京地区沙尘型粒子所占比例最大(6.11%),而 DT/DB 融合算

表3 MODIS AOD 与地基 AOD 相关性

Table 3 Correlation between MODIS AOD and foundation AOD

Relevance R^2	Beijing-RADI	Beijing-CAMS	Xuzhou-CUMT	Taihu	Hong_Kong_PolyU	Hong_Kong_Sheung
Nearest neighbor pixel	0.7384	0.6858	0.7073	0.4947	0.6654	0.6349
Four pixel mean	0.6707	0.7364	0.4386	0.0236	0.9015	0.2052

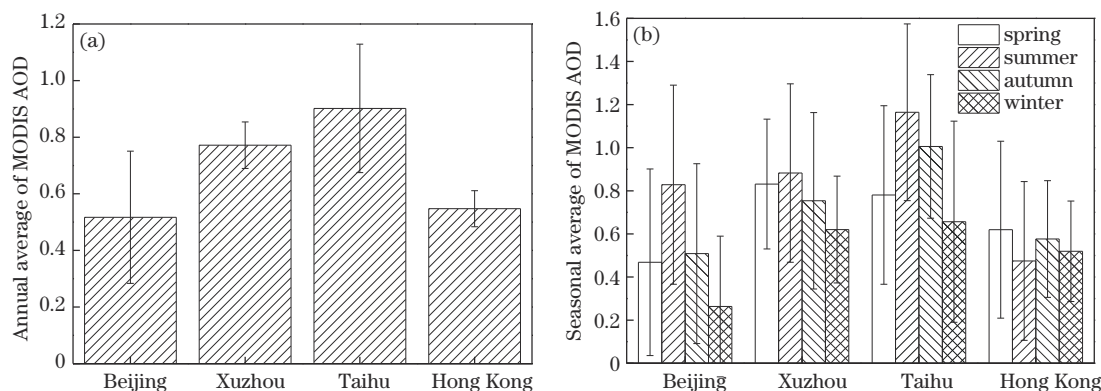


图2 MODIS AOD(a)年和(b)季均值变化

Fig. 2 Variations of (a) annual and (b) seasonal MODIS AOD averages

法中将非沙尘情况下的中国东部地区全部按照工业气溶胶处理^[17-18],与实际不符,另外沙尘型粒子有效半径较大,对红外和近红外通道有一定影响,导致地面反射率估计偏高,气溶胶光学厚度反演结果偏低。而太湖地区,一方面因算法采用的气溶胶模式存在误差,AOD反演中严重低估了SSA,造成了AOD高估,另一方面因太湖站点像元下垫面复杂,其中的污染水体使站点所在混合像元的表观反射率上升,导致卫星接收到的表观反射率显著提升,污染水体对表观反射率的贡献量被误认为是气溶胶的贡献,使MODIS反演结果进一步偏高^[19-22];2)在AERONET站点处,北京、徐州和香港地区MODIS AOD与地基AOD季均值变化趋势完全一致,而太湖地区MODIS AOD夏季>秋季>春季>冬季,与地基检测结果夏季>春季>秋季>冬季的结果有所不同,结合上文提到的太湖地区MODIS AOD年均值显著大于地基监测值分析发现,太湖地区夏秋季节MODIS AOD显著高于地基检测值,从而导致其MODIS AOD年均值偏大。而太湖地区夏秋季节MODIS AOD显著高于地基检测值的主

要原因是太湖夏秋季节蓝藻污染频发,太湖水体污染严重,污染水体对表观反射率的贡献量被误认为是气溶胶的贡献量。

4 AE时间序列分析

图3为北京、徐州、太湖、香港四个地区AE年、季均值比较图,由图可知:1)四个地区AE年均值香港>太湖>徐州>北京,依次为 1.314 ± 0.054 、 1.213 ± 0.084 、 1.198 ± 0.104 、 1.118 ± 0.078 ,表明中国东部地区污染物的粒径从北往南逐渐减小;2)北京四季AE为秋季>夏季>冬季>春季,徐州、太湖地区为秋季>冬季>夏季>春季,香港为春季>秋季>冬季>夏季。北京、徐州、太湖地区AE均为秋季最大春季最小,而香港AE春季最大。分析认为,香港气溶胶以细粒子为主(占99.57%),细粒子容易飘浮在空气中,而香港春季风速最小(4.22 m/s),大气扩散和输送能力最弱,大气边界层稳定度最强,稳定度抑制了气溶胶粒子的积累^[23],所以导致香港春季气溶胶平均粒径最小。

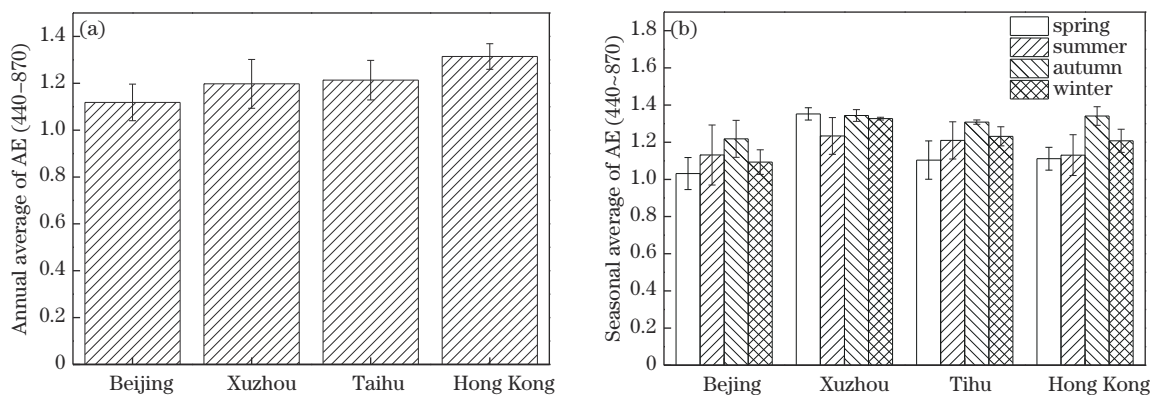


图3 AE(a)年和(b)季均值变化

Fig. 3 Variations of (a) annual and (b) seasonal AE averages

5 气溶胶类型分析

FMF的定义为细粒子光学厚度与总光学厚度的

比值,可表征在气溶胶模式中占主导地位的气溶胶粒子^[24]。FMF>0.6时,气溶胶模式中以细粒子为主,0.4≤FMF≤0.6时,气溶胶模式为混合型;FMF<0.4

时,粗粒子占主导地位。本文 FMF 取 AERONET 产品中 500 nm 波段处的值。

SSA 表征一次散射过程中散射光强在整个削弱光强中所占的比例^[24],可据此区分吸收和非吸收特性的气溶胶。本文中 SSA 取 AERONET 产品中 675 nm 波段处的值。

运用 SSA 和 FMF,陆地气溶胶可分为七种类型^[24-25]: 1) $SSA < 0.95$, $FMF < 0.4$, 沙尘类型; 2) $SSA > 0.95$, $FMF < 0.4$, 不确定类型; 3) $0.4 < 0.6$, $FMF < 0.6$, 混合型; 4) $SSA > 0.95$, $FMF > 0.6$, 强散射类型细粒子为主,通常为城市、工业型; 5) $0.90 < SSA \leq 0.95$, $FMF > 0.6$, 弱吸收类型细粒子为主; 6) $0.85 < SSA \leq 0.90$, $FMF > 0.6$, 中度吸收类型细粒子为主; 7) $SSA \leq 0.85$, $FMF > 0.6$, 强吸收类型细粒子为主。

AOD 较小时,SSA 反演误差较大,故先将 AOD $440 \text{ nm} < 0.4$ 时对应的 SSA 剔除^[26-27],然后将 FMF 与 SSA 按共同有效观测日进行匹配,得到四个地区气溶

胶类型的百分比图(图 4)。由图 4 可知:1)北京、徐州、太湖、香港四个地区均以弱吸收型细粒子所占比重最大,依次为 38.29%、44.99%、44.30%、48.14%;2)与香港地区相比,北京、徐州、太湖地区混合型气溶胶粒子所占比重较大,依次为 8.84%、7.68%、10.69%,而香港地区占比为 0。分析认为,北京、徐州、太湖地区春季受西北部沙尘影响,秋季受秸秆焚烧影响,冬季受煤烟排放影响,还有交通排放、工业污染的影响,而香港地区大气环境相对简单,主要以工业和交通污染为主;3)北京、徐州、太湖、香港地区强散射型细粒子依次占 15.76%、35.82%、17.02%、15.69%,与 AOD 年均值徐州>太湖>北京>香港的变化一致,粒子的散射性随消光系数的增大而增大,这与 Kim 等^[28]、张勇等^[29]的研究结果一致;4)北京、太湖、徐州地区的沙尘型气溶胶粒子依次占 5.60%、0.84%、2.13%,而香港地区所占比重为 0,这是由于北京、太湖、徐州地区受到了我国西北地区沙尘远距离输送的影响。

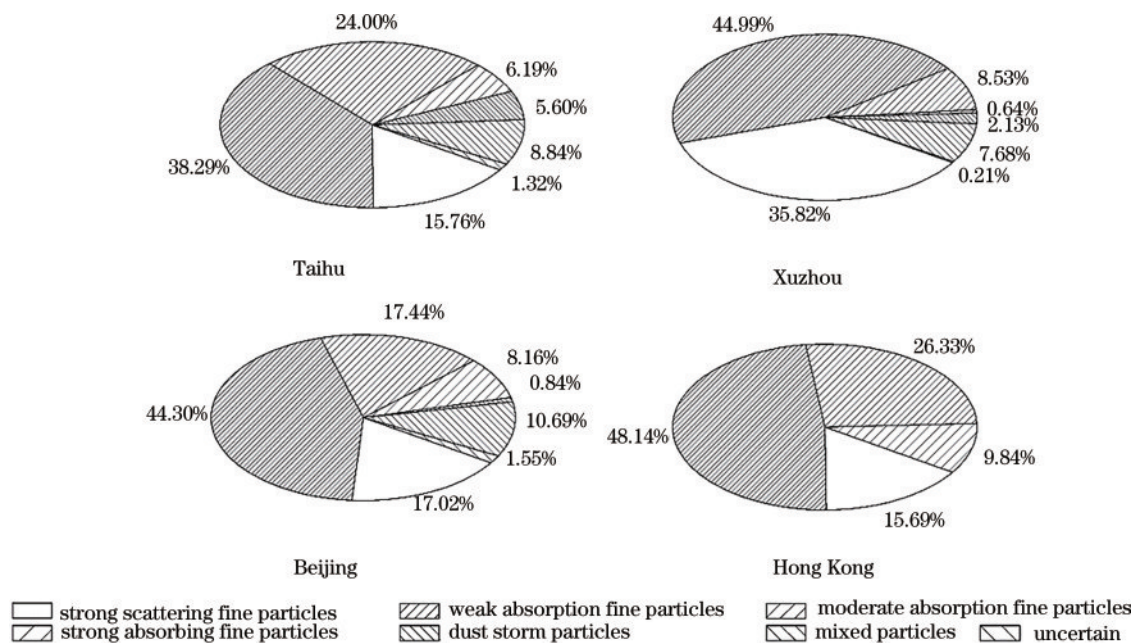


图 4 气溶胶粒子类型分布情况

Fig. 4 Particle type distribution of aerosol

6 结 论

本文基于我国东部沿海岸线分布的 Beijing-RADI、Beijing-CAMS、XuZhou-CUMT、Taihu、Hong_Kong_PolyU、Hong_Kong_Sheung 六个 AERONET 长期观测站点自加入 AERONET 观测网以来至 2016 年 9 月的 AOD、AE、SSA、FMF 四种气溶胶物理光学特性观测产品,研究了中国东部地区气溶胶时空变化特性及类型特性。研究表明:

1) 北京、徐州、太湖、香港四个地区地基 AOD 年均值徐州>太湖>北京>香港,依次为 0.805 ± 0.129 、

0.775 ± 0.069 、 0.664 ± 0.197 、 0.519 ± 0.125 ,其中北京、徐州、太湖地区地基 AOD 季均值均为夏季最大,冬季最小,唯香港地区因其夏季降雨频繁,致使其夏季 AOD 最小。

2) 在 AERONET 站点处,MODIS AOD 年均值检测值太湖>徐州>香港>北京,依次为 0.902 ± 0.227 、 0.772 ± 0.082 、 0.547 ± 0.064 、 0.517 ± 0.234 ,与地基检测依次相差 22.2%、4.1%、5.5%、16.3%,因气溶胶模型选取误差,以及受北京地区沙尘型粒子、太湖地区污染水体的影响,导致北京地区 MODIS AOD 年均值显著小于地基监测值,太湖地区 MODIS

AOD 年均值显著大于地基监测值;北京、徐州和香港地区 MODIS AOD 与地基 AOD 季均值变化趋势完全一致,唯太湖地区检测结果略有不同。

3) AE 年均值香港>太湖>徐州>北京,依次为 1.314 ± 0.054 、 1.213 ± 0.084 、 1.198 ± 0.104 、 1.118 ± 0.078 ,表明中国东部地区污染物的粒径从北往南逐渐减小,另外,北京、徐州、太湖地区 AE 季节变化均为秋季最大、春季最小,而香港地区 AE 最大值出现在春季。

4) 北京、徐州、太湖、香港四个地区均以弱吸收型细粒子所占比重最大,依次为 38.29%、44.99%、44.30%、48.14%,中度吸收型细粒子和强散射细粒子次之,其他类型的粒子均较少。

致谢 对于 AERONET 网提供的气溶胶观测数据、世界天气网 (<https://rp5.ru>) 和历史天气网 (<http://lishi.tianqi.com>) 提供的气象数据,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 韩亚芳. 徐州地区多源卫星遥感气溶胶数据的地面验证及分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
Han Y F. Ground verification and analysis of multi-source satellite remote sensing aerosol data in Xuzhou area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [2] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 255-278.
- [3] Xin J Y, Du W P, Wang Y S, et al. Aerosol optical properties affected by a strong dust storm over central and Northern China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(3): 562-574.
- [4] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [5] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961-2000[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(6): L06803.
- [6] Xia X. A closer looking at dimming and brightening in China during 1961-2005[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, 28: 1121-1132.
- [7] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. Horizontal visibility trends in China 1981-2005[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): L24706.
- [8] 杨倩, 郭媛媛, 孙颖姝, 等. 太原盆地霾日气溶胶垂直分布及气象要素分析[J]. *中国激光*, 2022, 49(7): 0710002.
Yang Q, Guo Y Y, Sun Y S, et al. Analysis of aerosol vertical distribution characteristics and meteorological elements of haze day in the Taiyuan Basin[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0710002.
- [9] 汤付颖, 周海金, 王维和, 等. TROPOMI 吸收性气溶胶指数反演算法及其应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1601001.
Tang F Y, Zhou H J, Wang W H, et al. Absorbing aerosol index inversion algorithm of TROPOMI and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1601001.
- [10] Kaufman Y J, Gitelson A, Karnieli A, et al. Size distribution and scattering phase function of aerosol particles retrieved from sky brightness measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 10341-10356.
- [11] 康汉青, 朱彬, 樊曙先. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(5): 523-530.
Kang H Q, Zhu B, Fan S X. Size distributions and wet scavenging properties of winter aerosol particles in north suburb of Nanjing[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(5): 523-530.
- [12] 姚克亚, 郭俊, 傅云飞, 等. 气溶胶粒子的降雨清除[J]. *气候与环境研究*, 1999, 4(3): 297-302.
Yao K Y, Guo J, Fu Y F, et al. Rain scavenging of aerosol particles[J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(3): 297-302.
- [13] 周黎明, 陈跃, 牛生杰, 等. 祁连山北坡夏季晴天气溶胶粒子变化特征[J]. *干旱气象*, 2014, 32(2): 233-238.
Zhou L M, Chen Y, Niu S J, et al. Variation characteristics of aerosol particles from clear sky in the north slope of Qilian Mountain[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, 32(2): 233-238.
- [14] 洪钟祥, 周乐义, 沈剑青, 等. 气溶胶粒子干沉降速度的测量[J]. *大气科学*, 1987, 11(2): 138-144.
Hong Z X, Zhou L Y, Shen J Q, et al. The measurements of aerosol dry deposition[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1987, 11(2): 138-144.
- [15] 朱爱华, 李成才, 刘桂青, 等. 北京地区 MODIS 卫星遥感气溶胶资料的检验与应用[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(1): 86-90.
Zhu A H, Li C C, Liu G Q, et al. Validation and application of MODIS remote aerosol information in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(1): 86-90.
- [16] 李成才. MODIS 遥感气溶胶光学厚度及应用与区域环境大气污染研究[D]. 北京: 北京大学, 2002.
Li C C. MODIS remote sensing aerosol optical depth and its application in the study of regional environmental air pollution[D]. Beijing: Peking University, 2002.
- [17] Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, et al. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16815-16830.
- [18] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [19] 郑有飞, 董自鹏, 吴荣军, 等. MODIS 气溶胶光学厚度在长江三角洲地区适用性分析[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 224-234.
Zheng Y F, Dong Z P, Wu R J, et al. Validation of

- modis aerosol optical thickness retrieval over Yangtze delta region of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 224-234.
- [20] 王宏斌, 张镭, 焦圣明, 等. 基于 AERONET 观测资料对 MODIS 气溶胶产品的验证[C]//第 31 届中国气象学会年会 S6 大气成分与天气、气候变化. 北京: 中国气象学会, 2014: 570-582.
Wang H B, Zhang L, Jiao S M, et al. Validation of MODIS aerosol products based on AERONET observation data[C]//The 31st annual meeting of China Meteorological Society S6 Atmospheric Composition and Weather, Climate Change. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2014: 570-582.
- [21] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11): 2989-3034.
- [22] 韩亚芳, 吴立新, 白杨, 等. 太湖北岸气溶胶光学特性长期变化特征[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2492-2503.
Han Y F, Wu L X, Bai Y, et al. Long-term variation of aerosol optical properties at Tai Lake's north bank[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(7): 2492-2503.
- [23] 张勇. 我国大气气溶胶与边界层相互作用的研究进展[C]//第 27 届中国气象学会年会大气物理学与大气环境分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2010: 412-416.
Zhang Y. Research progress on the interaction between atmospheric aerosols and boundary layer in China[C]//Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society, Atmospheric Physics and Atmospheric Environment. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2010: 412-416.
- [24] 陈好, 顾行发, 程天海, 等. 中国地区气溶胶类型特性分析[J]. *遥感学报*, 2013, 17(6): 1559-1571.
Chen H, Gu X F, Cheng T H, et al. Characteristics of aerosol types over China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(6): 1559-1571.
- [25] Lee J, Kim J, Song C H, et al. Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(26): 3110-3117.
- [26] Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 590-608.
- [27] Gu X F, Wang S P, Fang L, et al. Sensitivity study on polarized aerosol retrievals of PARASOL in Beijing and Kanpur[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2011, 4(5): 5773-5806.
- [28] Kim S W, Yoon S C, Jefferson A, et al. Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001 [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(1): 39-50.
- [29] 张勇. 北京城市大气气溶胶光学特性观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
Zhang Y. Aerosol optical properties observed at an urban area of Beijing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.