

引用格式: Wang Haotian, Wang Yuan, Yuan Qiangqiang. Validation and Spatiotemporal Analysis of MODIS Multi-angle Atmospheric Calibration Aerosol Products in China from 2008 to 2016[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 217-228. [王浩天, 汪源, 袁强强. 2008~2016年MODIS多角度大气校正气溶胶产品在中国的时空分布及变化趋势[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 217-228.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0217

## 2008~2016年MODIS多角度大气校正气溶胶产品在中国的时空分布及变化趋势

王浩天, 汪源, 袁强强  
(武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:**探究全国大气气溶胶分布及变化特征, 准确了解中国地区气溶胶光学特性对研究大气环境污染、应对全球气候变化是非常重要的。对2008~2016年的MODIS MAIAC气溶胶光学厚度数据在中国的适用性进行验证, 并采用Mann-Kendall方法, 从不同的时空尺度和气溶胶类型上分析中国地区AOD值的时空变化特征。结果表明: ①验证表明C6的MAIAC反演结果在中国AERONET匹配点上表现良好, C6的MAIAC反演AOD结果适用于中国区域; ②从年际尺度上看, 2008~2016年AOD年均值整体呈波动下降; 从季节尺度上看, AOD季节变化呈春季整体高、夏季中心高、秋冬季水平低的特点, 各省AOD平均值及各省份划区AOD平均值随季节变化趋势相似。③在空间上, AOD呈东南高、西北低、高值中心聚集的特征。④中国AOD变化整体呈现出东部减少且集聚, 西部增加且分散的变化特征。可进一步探究不同种类气溶胶分布和气溶胶与典型大气污染物分布关系, 以期为中国环境污染治理提供更好的决策指导。

**关键词:** MODIS MAIAC; 气溶胶光学厚度; 时空分布; 变化趋势分析; 中国地区

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)01-0217-12

### 1 引言

在全球气候系统中, 气溶胶在空间分布和时间分布上都有很大差异性<sup>[1]</sup>。通常用气溶胶光学厚度(AOD)这个关键参数来描述气溶胶光学性质, 它是气溶胶的消光系数在垂直方向上的积分, 在推算气溶胶含量和研究气溶胶气候效应方面有着重要作用<sup>[2-3]</sup>。

搭载在Terra和Aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)的AOD反演产品<sup>[4]</sup>作为最广泛使用的产品, 一直受到学者们的青睐。在研究气溶胶光学厚度时空趋势方面, 国内外很多学者做了相关研究。He等<sup>[5]</sup>对2003~2016年MODIS AOD在中

国的时空模式进行研究, 发现AOD的全国平均中心从2003~2016年向西北方向移动, 地形主导了中国气溶胶负荷的空间变化。Zhang等<sup>[6]</sup>使用2002~2015年MODIS AOD数据分析了中国地区气溶胶光学厚度时空分布及影响因素, 认为从时空分布上长江三角洲地区和4月份污染最为严重, 地形和人口与AOD关系非常密切, NDVI与AOD表现出一定的空间异质性。关佳欣和李成才<sup>[7]</sup>对2000~2019年我国中部、东部AOD时空分布和变化进行分析, 发现中、东部地区呈增长趋势, 夏季AOD增长最快。赵仕伟等<sup>[8]</sup>对MODIS C6数据在中国西北地区的适用性进行验证, 分析得到了西北不同气候区域AOD的时空分布特点及成因。刘状等<sup>[9]</sup>利用

收稿日期: 2019-09-19; 修订日期: 2020-11-15

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”子课题(XDA19090104)。

作者简介: 王浩天(1998—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事定量遥感研究。E-mail: 1067634800@qq.com

通讯作者: 袁强强(1986—), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 主要从事遥感影像质量改善与信息融合等研究。E-mail: qqyuan@sgg.whu.edu.cn

2001~2017年MODIS MOD08M3的AOD数据,对中国北方省份以GIS统计分析方法和集合经验模态分解方法(EEMD)进行时空分析,从频率域角度提取不同尺度AOD时间序列变化规律,也得到人口密度和地形因素与AOD空间分布有着密切关系的结论。刘海知等<sup>[10]</sup>利用2001~2017年MODIS Terra C6.1 AOD月数据采用最小二乘分析了全国AOD时空分布,发现AOD的两个显著高值中心分别在华北平原和塔克拉玛干沙漠地区,两个低值中心分别在内蒙古地区东部至东北地区北部以及青藏高原。Li等<sup>[11]</sup>提出了一种约束混合效应装袋模型的方法,以利用通过大气校正的多角度实现(MAIAC)检索的高分辨率AOD及其他时空预测因子和空间自相关来得到可靠的每日PM<sub>2.5</sub>高空间分辨率反演结果。结果表明,仅通过测量无法捕获所需的时间时可以应用于其他区域的PM<sub>2.5</sub>暴露估算。这些研究分别从不同角度对中国不同地区AOD时空分布进行分析,但是存在AOD数据空间分辨率低、研究时间序列较短的问题,并且对中国整体研究和地理位置临近及气候相似的省份划区研究还较缺少,并少见使用更系统的分析方法对AOD时空分布进行分析。

最近,MODIS发布了新的AOD反演算法,即大气校正多角度实现(MAIAC)AOD产品<sup>[12]</sup>。采用时间序列方法动态获得MODIS蓝色和短波红外波段在暗区和明亮区域之间的表面反射关系,不仅改进算法后精度有所提高,还显著提高了空间分辨率。但由于数据集为日产品,研究全国尺度数据量以及处理难度很大,目前实现用该数据集对中国地区适用性进行验证并研究较长时间序列中国气溶胶时空变化的研究工作十分少见。本研究对2008~2016年MODIS MAIAC气溶胶光学厚度数据在中国的适用性进行验证,并采用Mann-Kendall方法,从时间尺度和空间尺度上对中国地区进行连续的趋势观测分析,并讨论气溶胶的时空分布,揭示AOD空间格局变化,以期应对大气环境污染、全球气候变化的决策提出合理依据。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究区域

中国领土辽阔广大,地势西高东低,呈阶梯状分布。地形复杂多样,其中山区、高原面积广大,经纬度范围大致为:17°~55°N, 73°~136°E。中国地

区幅员辽阔,气温、降水类型组合丰富多样,形成多种多样的气候。

中国共有34个省级行政单位,本研究中香港、澳门、台湾等3个省级行政单位不计入统计。观察到青藏高原地区站点稀少,只有一个站点,位于海拔4 726 m的青藏高原喜马拉雅山北坡,可知站点MODIS反演精度较差,存在严重的高估,且该地人烟较为稀少,污染程度较轻,地面观测AOD均值低,仅有0.052,在AOD偏低时地表反射率是MODIS反演误差的主要来源,因此在青藏高原地区MODIS对地面反射率估计不准确,导致AOD产品误差很大<sup>[13]</sup>,对分析该地AOD时空特性没有良好的贡献,因此对位于青藏高原的西藏省数据加以剔除。

中国省份按照地理位置等因素可划分为七大地理区,采用自然地理划分方式,是中国自然地理区划方面众多专家多年的科研成果,各地理区所含省份有着临近的地理位置关系和相似的气候特点,同时在社会经济发展上也形成了分区特点,对七大地理区进行统计分析有助于中国大面积区域进行大气环境的整体决策。

详细列出了七大地理区划分的具体省份和本研究中选择统计的省份。包括:东北(黑龙江省、吉林省、辽宁省),华东(上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、山东省),华北(北京市、天津市、山西省、河北省、内蒙古自治区),华中(湖南省、河南省、湖北省),华南(广西壮族自治区、广东省、海南省),西南(四川省、贵州省、云南省、重庆市),西北(陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区)。

### 2.2 数据集

#### 2.2.1 AERONET地面站点

AERONET提供具有高时间分辨率(约15 min)的全球分布的光谱AOD观测值,范围为0.34~1.06  $\mu\text{m}$ ,本研究中数据来源于<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>网站。AERONET产品具有高精度和高标准化的特点,本研究中将版本3.0的AERONET AOD 2级产品数据近似地认为是地面真实值,总共采用17个站点,详细信息见表1。

#### 2.2.2 MODIS MAIAC AOD产品

MAIAC产品可以提供470 nm和550 nm的AOD反演结果,分辨率为1 km,可通过NCCS(<ftp://maiac@dataportal.nccs.nasa.gov/DataRe->

表 1 AERONET 站点详细信息

Table1 AERONET site details

主要地表类型	站点名称	纬度/经度(°)	时间区间
城区	Beijing 北京(BJ)	39.977/116.381	2008~2016 年
	Beijing-CAMS 北京-气象局(BJC)	39.933/116.317	2012~2016 年
	Zhongshan_ Univ 中山大学(ZSU)	23.060/113.390	2011~2012 年
高海拔植被	Lulin 鹿林(LL)	23.469/120.874	2008~2016 年
	SACOL 兰州大学(SA)	35.946/104.137	2008~2013 年
	AOE_Baotou 包头(ABT)	40.852/109.629	2013 年
	Xinglong 兴隆(XL)	40.396/117.578	2008~2014 年
低海拔植被	Shouxian 寿县(SX)	32.558/116.782	2008 年
	Hangzhou_City 杭州市(HZC)	30.290/120.157	2008~2009 年
	NUIST 南京信息工程大学(NU)	32.206/118.717	2008~2010 年
	Hefei 合肥(HF)	31.905/117.162	2008 年
	PKU_PEK 北京大学(PP)	39.593/116.184	2008 年
	XiangHe 香河(XH)	39.754/116.962	2008~2016 年
	Kaiping 开平(KP)	22.315/112.539	2008 年
水域	Hong_Kong_PolyU 香港理工大学(HKP)	22.303/114.180	2008~2016 年
	EPA-NCU (EN)	24.968/121.185	2008~2016 年
	Taihu 太湖(TH)	31.421/120.215	2008~2016 年

lease)获得。对于中国来说,每幅AOD影像包含像素数约为:5 000×6 000,数据量以及处理难度很大。MAIAC算法采用时间序列方法动态获得MODIS蓝色和短波红外波段在暗区和明亮区域之间的表面反射关系,考虑了双向表面反射的影响<sup>[13]</sup>。MAIAC AOD在密集植被区域的精确度高于DT算法,并且通常可以提高明亮区域DB反演的准确性<sup>[14]</sup>。本研究采用2008~2016年中国550 nm Terra的C6 MAIAC AOD产品进行验证。为便于利用ArcGIS制作AOD分布图进行分析AOD分布,在以下所有分析制图中,AOD值数值上均乘1 000。

## 2.3 方 法

### 2.3.1 验证方法

MAIAC AOD产品在中国区域的验证是十分有必要的。MAIAC产品采用了文献[15]中使用的验证方法。由于AERONET提供一个点的重复测量,而卫星在一个时刻提供某个区域的测量。AERONET和MODIS测量必须在空间和时间上进行匹配。在本研究中,选取AERONET Level 2.0级AOD数据产品,具体数据时段和站点信息见表1。选取以站点为中心25 km×25 km范围内MODIS产品数据的空间平均与卫星过境前后1 h的AERONET地基数据的时间平均进行匹配。AERONET仪器收集多个波长的数据,其中许多波长与使用的MODIS通道(550 nm)略有不同。因

此,使用Ångström指数( $\alpha$ ),根据500 nm的AOD和440~670 nm的插值得到550 nm处的AOD,其定义如式(1)所示。

$$\alpha = -\frac{\ln(\tau_1/\tau_2)}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (1)$$

其中: $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 代表波长为 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 的AOD。选择验证结果的精度指标有预期误差(EE),该误差来自散点图上1:1线上方和下方的两个线性包络,散点图包含匹配点的大约一个标准偏差,如公式(2)所示;均方根误差(RMSE)如公式(3)所示;平均绝对误差(MAE)如公式(4)所示;和相对平均偏差(RMB)如公式(5)所示。

$$EE = \pm(0.05 + 0.15 \times AOD_{AERONET}) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (AOD_{(MODIS)_i} - AOD_{(AERONET)_i})^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |AOD_{(MODIS)_i} - AOD_{(AERONET)_i}| \quad (4)$$

$$RMB = \overline{AOD_{MODIS}} / \overline{AOD_{AERONET}} \quad (5)$$

其中: $AOD_{MODIS}$ 和 $AOD_{AERONET}$ 分别代表来自卫星和地面站点的AOD反演结果。上横线表示平均AOD反演结果。

### 2.3.2 数据分析方法

本文使用Mann-Kendall方法<sup>[16]</sup>进行数据分析。Mann-Kendall方法通过对数据以栅格像元为单位进行时序连续累积分析,可以得到长时间序列上目标趋势,从而有效区分某一自然过程是处于自然波



动还是存在确定的变化趋势。它是一种广泛用于地球观测数据分析的非参数统计检验方法,因为当应用于长序列单调非线性数据测试时,由于它对整个序列过程进行累积,所以不会受到异常值的不利影响<sup>[16]</sup>。Mann-Kendall方法公式如下:

设定  $\{AOD_i\}$ ,  $i=2008, 2009, \dots, 2016$

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(AOD_j - AOD_i) \quad (6)$$

式中:  $AOD_i$  和  $AOD_j$  分别为像元第  $i$  和  $j$  年的 AOD 值;  $n$  是时间序列的长度;  $\text{sgn}$  是符号函数。  $S > 0$  表示 AOD 呈增加趋势,  $S = 0$  表示 AOD 无变化,  $S < 0$  表示 AOD 呈减少趋势。

### 3 数据验证

图1展示了本研究中所有站点 MAIAC 反演的验证结果。颜色条表示点数,红色实线表示回归线,虚线表示 EE 线,黑色实线表示 1:1 线。

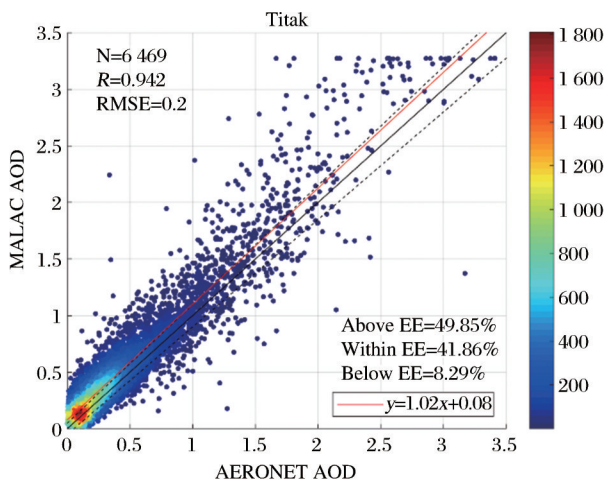


图1 MAIAC 反演验证结果

Figure 1 MAIAC inversion verification results

总体上看, C6 的 MAIAC 反演结果在中国 17 个 AERONET 站点的总共 6 469 个匹配点上表现良好。从图 2 中可以看到, 相关系数 ( $R$ ) 为 0.942, EE 内的分数较低, 仅为 41.86%。同时, EE 以上的分数有 49.85%, 表明中国的 MAIAC AOD 值反演结果是高估的。

选取的站点在全国范围内都有分布 (表 1), 对每个站点而言, 相关系数绝大多数都达到 0.8 以上, 12 个站点的相关系数在 0.9 以上 (表 2)。NASA 对陆地上 MODIS 气溶胶光学厚度规定的误差范围为  $\pm 0.05 \pm 0.15\tau$ , 验证结果满足 NASA 要求的超过 65% 的点在规定误差范围内, 说明 C6 的 MAIAC 反演 AOD 结果适用于中国区域。

表 2 展示了针对 AERONET 站点的 MAIAC 反演验证结果。其中, 相关系数 ( $R$ ) 在显著性水平  $p < 0.05$  下计算。  $N$  表示匹配点数,  $EE$  表示 AOD 检索的预期误差,  $Ele$  表示匹配区域的平均高程。

北京及其周边地区 MAIAC 反演结果较好, 如表 3 所示, 两个站点的  $R$  值均超过 0.96。EE 内的分数分别为 57.12% 和 51.72%, 表明估计良好。然而, 在中山大学站点 (ZSU) 中, EE 内的分数仅达到 27.03%, 并且可以观察到明显的高估。这可能是由于气溶胶模型的选择不当以及表面反射率的错误假设造成的<sup>[17]</sup>, 同时由于中国区的气溶胶模型主要来源于北京地区 AERONET 的地基观测统计<sup>[4]</sup>, 因此其他地区站点受误差影响可能较大。但是, 选取全国范围共 17 个站点, 提供了大量的广泛地域的观测数据, 对北京站点数据进行补充, 在全国尺度上和全部站点的相关系数仍是有效的, 因此验证结果依然适用于整体中国区域。

在低海拔的植被地点, MAIAC 反演结果的总  $R$  值比较高, 依然存在高估。除了在 XH 站点高估 28.35% 和在 KP 站点高估 18.18% 之外, 其他站点的 EE 以上的分数都超过 30%。可以推断, 在这些区域, 气溶胶模型的选择或表面反射率的构建可能会出现一些问题<sup>[18]</sup>。此外, 研究发现高海拔植被地点的高估率通常低于海拔低的地区, 特别是在 LL 处观察到显著高估,  $RMB$  值为 3.92。这可能是由于地形表面反射率的错误假设造成的。

对于水周围的区域而言, MAIAC 反演结果的  $R$  值比较好。然而与低海拔的植被地点类似, 对于所有位点都显示出高估, 并且 EE 以上的分数在 TH 处最高 (91.53%)。

## 4 结果分析

### 4.1 AOD 时间变化特征

#### 4.1.1 AOD 总体格局

2008~2016 年中国 AOD 的多年平均分布如图 2 所示。通过对多年 AOD 空间分布特征进行分析, AOD 在空间分布上总体呈现东南高、西北低、高值中心聚集的特征。中国东南部为高值区, 且有两个显著的高值中心或高值聚集区, 一个高值聚集区由京津冀地区、山西省、山东省组成, 另一个高值中心位于四川省的四川盆地, 另外湖北省、江苏省 AOD 水平也较高。AOD 高值区人口密度大, 汽车尾气排放量大, 并且产业集中导致工业生产中能源

表 2 针对 AERONET 站点的 MAIAC 反演验证结果  
Table2 The results of the MAIAC inversion verification for the AERONET site

主要地表类型	站点	匹配点对数	R	RMSE	MAE	RMB	>EE %	:EE %	<EE %	AOD 均值	海拔/m
城区	BJ	1 257	0.961	0.17	0.1	1.04	26.41	57.12	16.47	0.49	50.7
	BJC	582	0.963	0.19	0.11	1.15	39.52	51.72	8.76	0.48	56.1
	ZSU	37	0.935	0.15	0.13	1.09	56.76	27.03	16.22	0.57	6.3
低海拔植被	HZC	51	0.95	0.21	0.13	1.07	39.22	49.02	11.76	0.72	15.7
	KP	11	0.972	0.07	0.06	1.03	18.18	81.82	0	0.61	18.7
	PP	9	0.894	0.55	0.39	1.21	66.67	11.11	22.22	1.26	35.8
	NU	75	0.95	0.15	0.13	1.07	49.33	29.33	21.33	0.78	21.1
	HF	36	0.962	0.1	0.08	1.07	36.11	58.33	5.56	0.64	37
	SX	52	0.97	0.14	0.1	1.09	38.46	51.92	9.62	0.63	24.8
	XH	1270	0.951	0.22	0.12	1.09	28.35	58.82	12.83	0.55	16.4
	ABT	24	0.938	0.08	0.07	1.34	54.17	45.83	0	0.18	1339.5
高海拔植被	SA	671	0.829	0.19	0.15	1.41	73.03	24.14	2.83	0.33	1802.6
	XL	694	0.935	0.15	0.09	1.37	44.09	53.17	2.74	0.21	764.8
	LL	522	0.791	0.16	0.15	3.92	94.44	5.56	0	0.05	2101.1
水域	HKP	401	0.872	0.16	0.13	1.32	70.07	26.93	2.99	0.37	102.5
	EN	352	0.86	0.16	0.12	1.31	60.23	33.52	6.25	0.31	121.5
	TH	425	0.921	0.34	0.29	1.5	91.53	7.06	1.41	0.57	8.7

燃烧排放大量废气,人为产生气溶胶多<sup>[8]</sup>。中国西北部大面积为低值区,塔里木盆地AOD水平略高于西部其他地区。西部及北部地区主要地形为山地、高原,人口稀疏、工业水平较低等原因使得人为产生气溶胶少<sup>[19]</sup>。同时注意到,在AOD分布图中,从东北到内蒙古地区有一条较为明显的斜线并向南延伸偏折,这可能是由于算法里气溶胶模式分块造成的,不同气溶胶模式会对气溶胶光学厚度反演产生影响,气溶胶模式的选择受地形、天气等因素制约<sup>[20]</sup>,北部地区与中部地区气溶胶模式不同,可能造成两侧结果差异较大,从而显示出一条界线。

4.1.2 AOD 年际变化趋势分析

2008~2016年中国AOD年均值空间分布情况如图3所示。自2008~2016年来AOD总体呈不断减少的趋势,东南部高值中心变化显著,西北部变化不显著。对东部和南部的两个显著的高值中心或高值聚集区,包括京津冀地区、山西省、山东省、四川省,这些区域AOD表现出显著下降趋势,特别是四川盆地AOD下降尤为显著。西部和北部AOD低值区大部分地区无明显变化,少数地区也表现出了下降的趋势,但变化不显著。中国西北部山区或高原密集分布,AOD值常年维持较低水平,因此无明显变化。

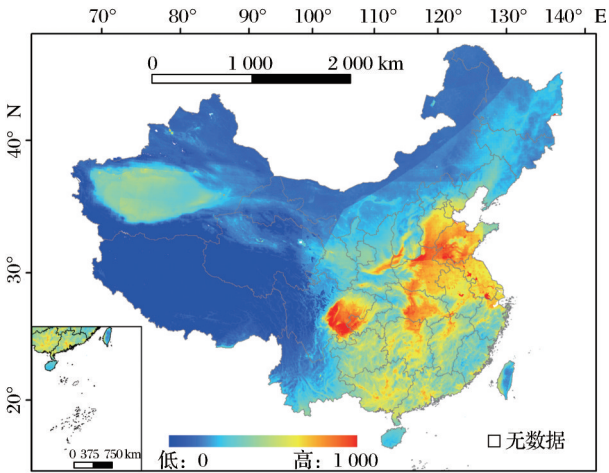


图 2 2008~2016年中国AOD多年平均分布图  
Fig.2 Average annual distribution of China's AOD in 2008~2016

4.1.3 AOD 季节变化趋势分析

本研究对多年四季AOD求均值进行AOD季节变化趋势分析如图4,保证了准确性和可靠性。AOD季节变化整体呈现出春季整体高、夏季中心高、秋冬季水平低的变化特征。其中春季中国整体大面积AOD水平较高,夏季在高值中心处AOD水平极高,达到四季中最高水平,秋季和冬季AOD水平较低,冬季略高于秋季。

春季,中国整体大面积AOD达到较高水平,东部AOD值较高,西部AOD值较低。由于中国北方

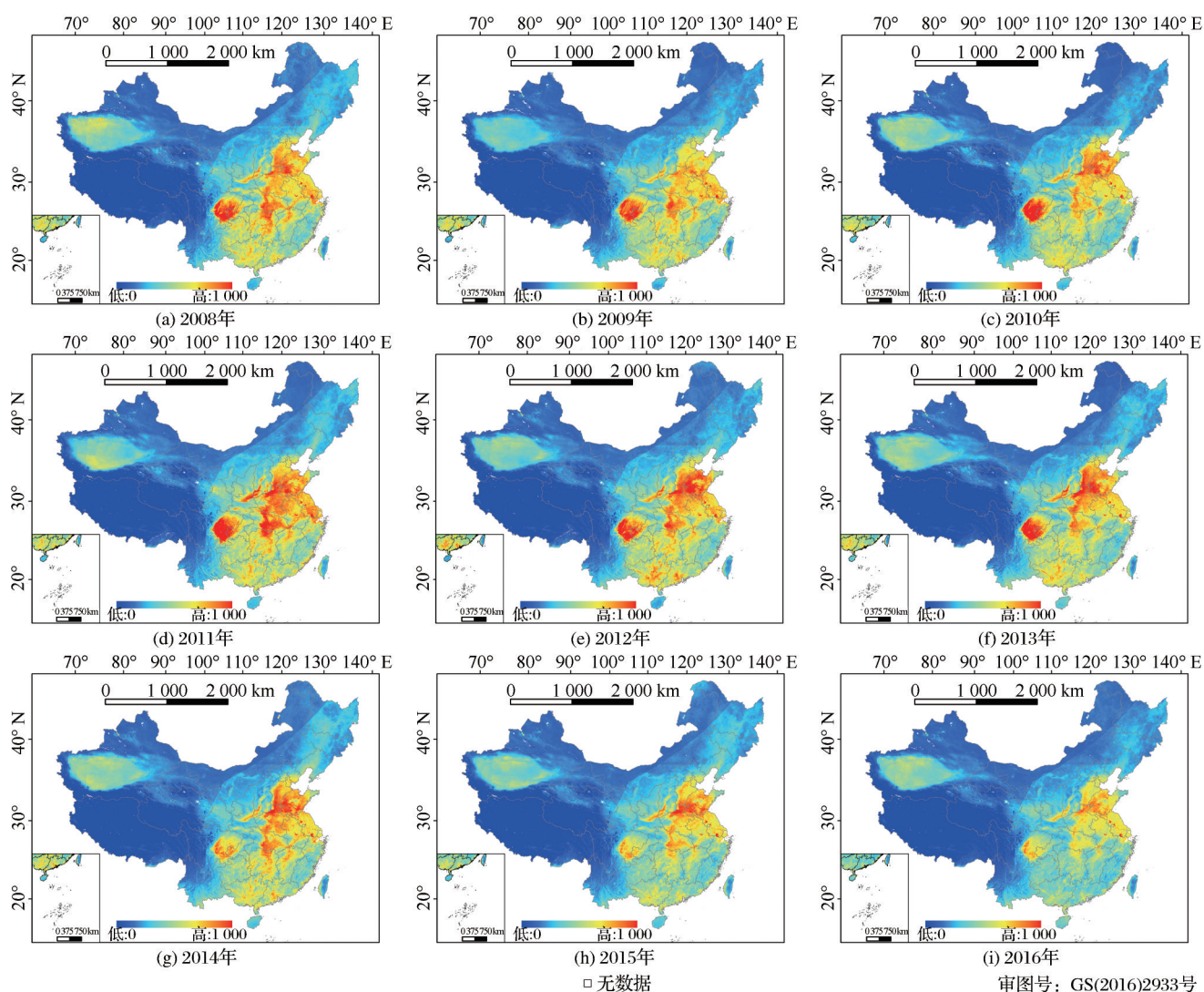


图3 2008~2016年中国AOD年均值分布图

Fig.3 2008~2016 China AOD annual average distribution map

此时处在供暖期,供暖系统的燃煤高温等因素为气溶胶贡献巨大,东北地区在中国北部地区内气溶胶水平偏高。中国东南部地区出现大面积高值,华中、华东、华南地区及西南地区的四川省气溶胶保持在非常高的水平,四川盆地是非常明显的气溶胶极高值中心。中国西部在春季受沙尘天气影响显著,使得这一区域AOD值在春季高于年平均值。在中国西部塔里木盆地区域出现明显的高值中心,可能受春季季风裹挟沙尘影响更大。青藏高原AOD值保持较低水平。

夏季,中国中东部地区出现较大面积AOD极高值聚集区,且达到全年最高水平,西北大部地区AOD值也略有升高。华北地区南部、华中和华东地区北部以及西北地区的东部部分地区出现全年中的最高值,包括山西省、陕西省、河南省、河北省、山

东省、湖北省、安徽省、江苏省、北京、天津地区,聚集成为中国大面积AOD极高值区,这些地区在夏季强人类活动和大空气湿度的影响下,气溶胶和雾霾积聚。四川盆地附近由于雨季雨水冲刷影响,AOD值相比于春季减少也较显著。西部地区受夏季强太阳辐射引起局部地区近地面干热粉尘对流影响,AOD略有升高。

秋季,中国大部地区的AOD值水平较低,高值区显著减少且极高值显著降低。西部地区AOD值呈现下降趋势,塔里木盆地附近AOD值也出现比较明显的减少。东部地区由于雨带北移,华中地区AOD值显著减少。夏季出现在中国中东部地区大面积AOD高值区在秋季呈现出非常显著的减少,特别是京津冀地区、山西省、山东省等地,由于秋季季风多,降雨水平增加,并且秋季空气湿度下降,使



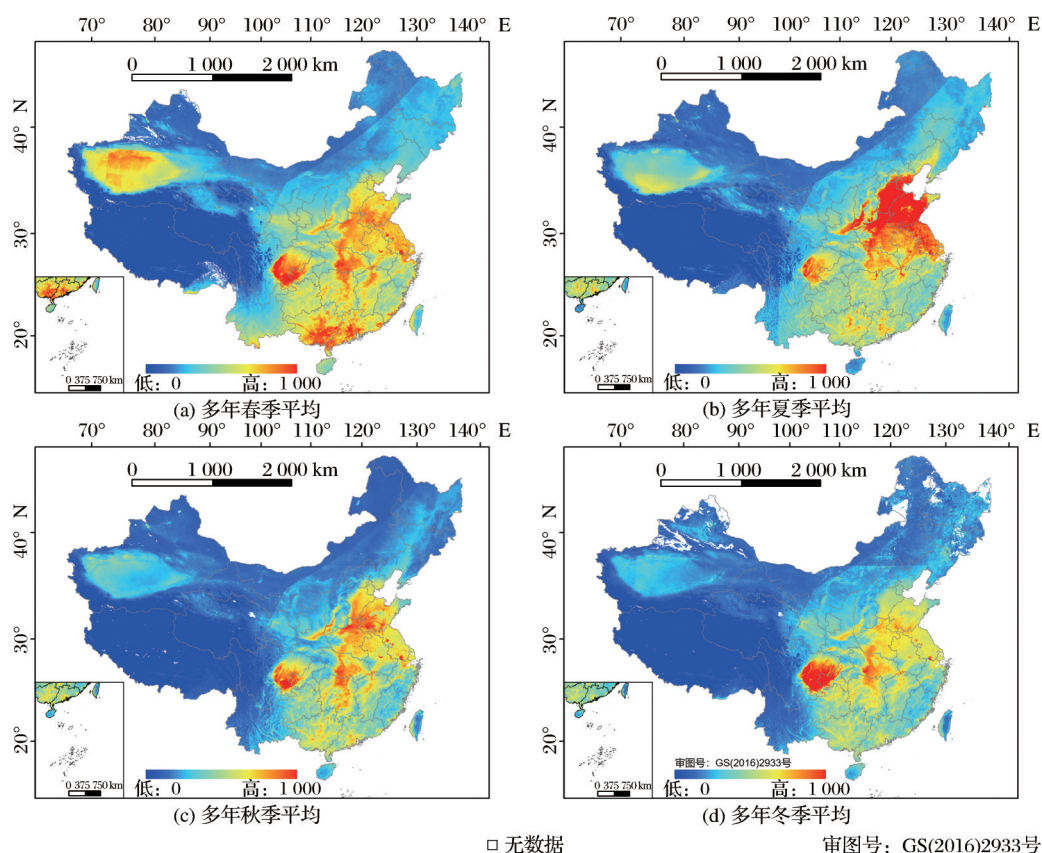


图 4 2008~2016年中国多年平均四季 AOD 值分布图

Fig.4 China's multi-year average four-year AOD value distribution map from 2008 to 2016

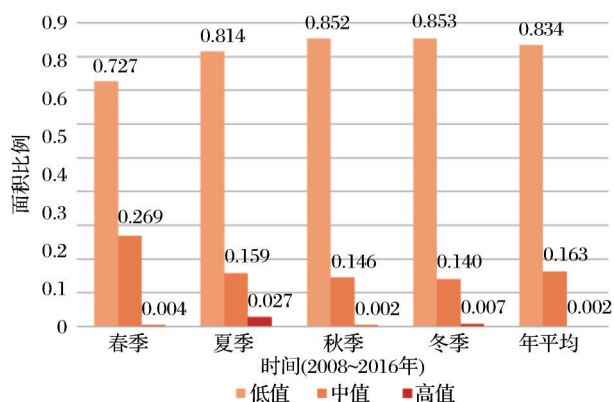


图 5 2008~2016年多年平均、多年四季平均 AOD 中国低、中、高值面积比例统计图

Fig.5 2008~2016 multi-year average, multi-year average AOD China low, medium and high value area ratio statistics

得气溶胶水平下降。

冬季,受北方雨雪天气影响,中国北部地区有部分区域出现数据缺失。在有数据区域,中国大部分地区 AOD 达到一年中的最低值,特别是华北、华东地区,这可能是由于北方冬季风盛行,气溶胶扩散效果良好,不容易积聚。华中地区气溶胶水平也

略有下降,但下降程度不显著。注意到四川省出现 AOD 极高值聚集中心,这可能受冬季风挟气溶胶粒子影响,在地势影响下不易弥散。中国西部地区 AOD 依然保持较低水平。

对 2008~2016 年多年平均和多年四季平均 AOD 全中国各省份低、中、高值面积比例统计如图 6。中国省份众多,各省地理位置、气候条件不同,工业水平、经济发展情况也各有差异,对每个省份 AOD 分析趋势,有助于探究各省不同季节 AOD 变化,分析典型省份大气气候特点。通常认为对 AOD 水平而言,AOD 值在 0~0.5 之间为低水平,0.5~1 之间为中间水平,超过 1 则认为 AOD 值较高,为制图方便,在后续分析中,将 AOD 值在 0~500 认为低值水平,500~1 000 为中值,大于 1 000 为高值<sup>[21]</sup>。低值区面积比例都在 0.7 以上,高值区面积比例都在 0.03 以下,说明全国范围内大部分区域 AOD 保持相对较低水平。低值区面积比例最大值出现在冬季,最小值出现在春季。注意到春季中值区面积比例较大,高值区面积比例较小,说明在春季全国大面积地区 AOD 水平会出现回升,与大面积地区的春季播种、秸秆焚烧等生物质燃烧关系密切。高值

区面积比例最大值出现在夏季,数值上是其余高值区面积比例结果的3~10倍,说明夏季达到气溶胶极高水平的区域面积较多,这与夏季人类活动增加、空气湿度增大有关。

图6展示了2008~2016年多年平均和多年四季平均AOD平均值各省份统计。从图6可以看出,各省AOD平均值随季节变化整体趋势相似,整体表现出由春到夏波动上升、随后波动下降的特点。这与前述分析得到的夏季AOD均值最高、春季次之、秋季和冬季为低值的结论一致。春季AOD平均值最高值出现在江苏省,夏季和秋季AOD平均值最高值在山东省,由于华东地区人口密集、工农业活动丰富,气溶胶水平高。冬季AOD平均值最高值在重庆,重庆属亚热带季风性湿润气候,冬暖少雪云雾多,冬季气候温和、云雾积聚多使得气溶胶水

平升高。四季AOD平均值最低值均在青海。多年平均AOD最高值在山东省,最低值在青海,说明以山东为代表的华东地区依然是气溶胶高水平聚集地区,而以青海省为代表的西北地区保持气溶胶较低水平。

图7是2008~2016年多年平均和多年四季平均中国省份七大区AOD均值统计图。由图8对中国省份七大区AOD均值的统计可以看出,各区AOD均值都表现出由春夏向秋冬逐渐减少的趋势。在东北、华东、华北地区,受夏季人类活动增强,夏末小麦主产区的农作物秸秆大量燃烧影响,因此夏季平均AOD值在多年四季平均和多年平均值中是最高的。对华中地区而言,它位于中国中部地区,受各自然和人为因素影响较为均衡,多年四季平均和多年平均值都相差不大,春季和夏季平均AOD值

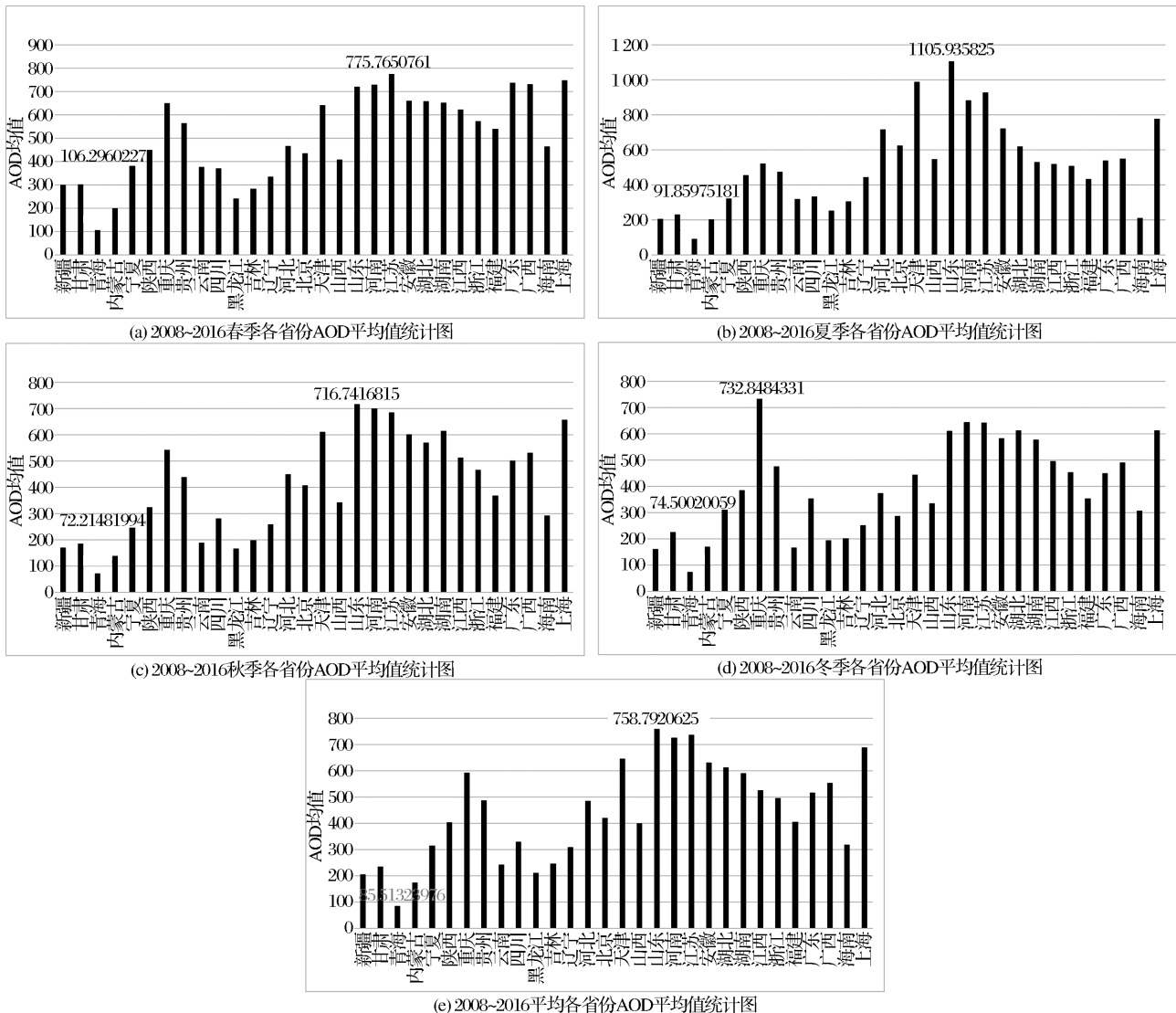


图6 2008~2016年多年平均和多年四季平均AOD平均值各省份统计图

Fig.6 2008~2016 multi-year average and multi-year average AOD average province statistics



略高于其他几个平均值。而对于华南、西南、西北地区,由于西南、西北地区多沙漠,春季季风裹挟大量沙尘,而大量的盆地地形使得气溶胶不易扩散,对于华南地区夏季降雨量增加,稀释了空气中的气溶胶粒子,因此在这3个地区春季平均AOD值在多年四季平均和多年平均值中是最高的。在全国范围AOD呈现出以华东和华中地区为高值中心向四周扩散减少的趋势,华北和华南地区AOD保持在中间水平,西北、西南和东北地区AOD平均值保持在较低水平。

#### 4.2 AOD空间变化特征

由图8可揭示2008~2016年AOD空间变化趋势。可以看出,在2008~2016年间,中国AOD变化整体呈现出东部减少且分布集聚,西部增加且分布分散的变化特征。AOD显著减少区域主要分布在华中地区、华东地区、华南地区以及位于西南地区东部的重庆市、贵州省等地,绝大部分位于南方地区。轻度减少区域主要为华北地区西部和北部,以及东北地区北部,西北地区东部也有轻微减少。增

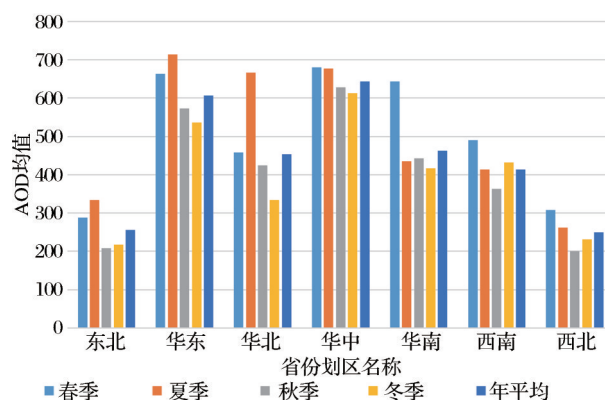
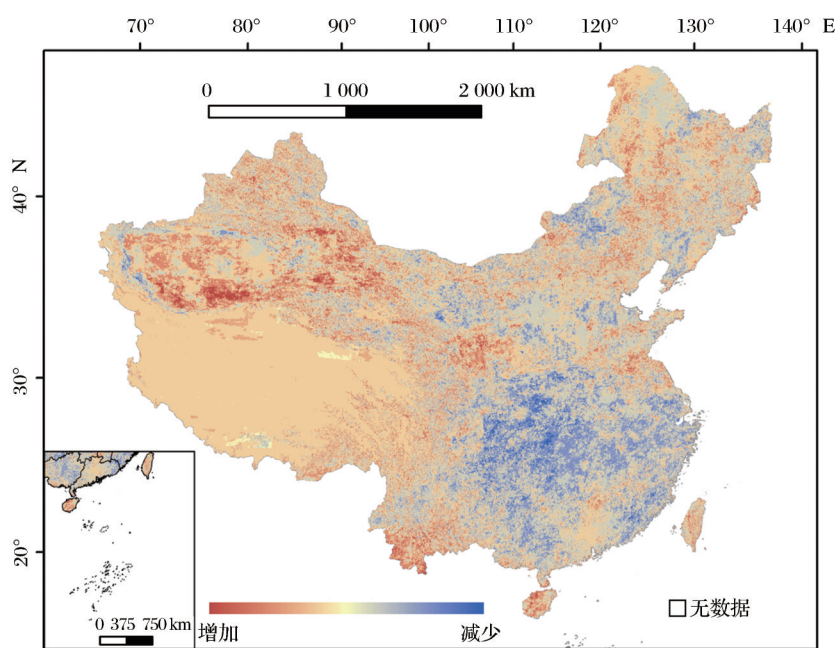


图7 2008~2016年多年平均和多年四季平均中国省份七大区AOD均值统计图

Fig.7 AOD average statistics of the seven regions of China's seven provinces in 2008~2016

加区域在全国范围内较分散,主要有西北地区、华北与东北地区接壤处,其中西北地区塔里木盆地附近区域是一个显著增加中心,此外华东地区北部的山东省、西南地区南部的云南省以及华南地区的海南省也有轻度增加趋势。



审图号: GS(2016)2933号

图8 2008~2016中国AOD Mann-Kendall方法趋势分析图

Fig.8 2008~2016 China AOD Mann-Kendall method trend analysis

图9是2008~2016中国各省AOD上升、不变和下降的面积比例统计图。大部分省份内出现大面积的AOD下降,包括重庆、贵州、湖北、湖南等省份在内的气溶胶高值区中心出现大面积的强下降趋势。长江中下游地区的鄂、湘、赣、皖、苏、浙、沪省

份气候湿润,且多梅雨,气溶胶粒子容易被沉降。少数省份表现出AOD下降与不变的面积比例大致相等或AOD不变面积占多数,北京AOD不变面积比例略高于下降,河北和天津均表现出AOD下降与不变面积比例大致相似。京津冀区域是

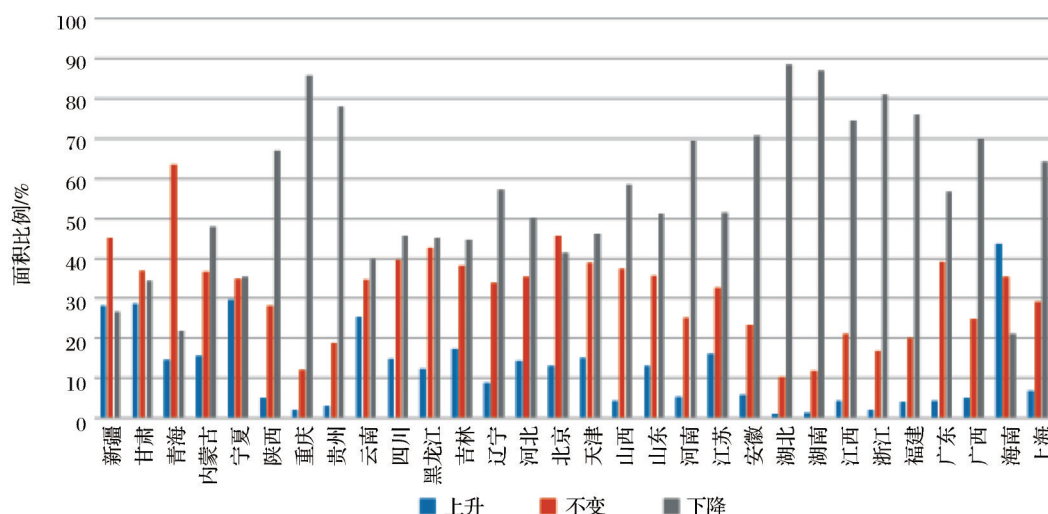


图9 2008~2016中国各省AOD上升、不变和下降的面积比例统计图

Fig.9 2008~2016 China's provinces AOD rising, unchanged and decreasing area ratio statistics

气溶胶高值中心,雾霾污染情况严重,与高能耗高污染工业及密集人口有密切联系。极少数省份AOD上升面积比例最大,如海南省。海南地处热带,有热带海洋性季风气候特点,是热门旅游城市,气溶胶上升多与旅游人口流量大和外源输送有着密切关系。

图10对2008~2016中国省份七大区AOD上升、不变和下降的面积比例进行统计。华中、华东及西南地区AOD下降面积比例最大,均超过50%的省份面积,华中地区下降面积最大,上升面积最小。

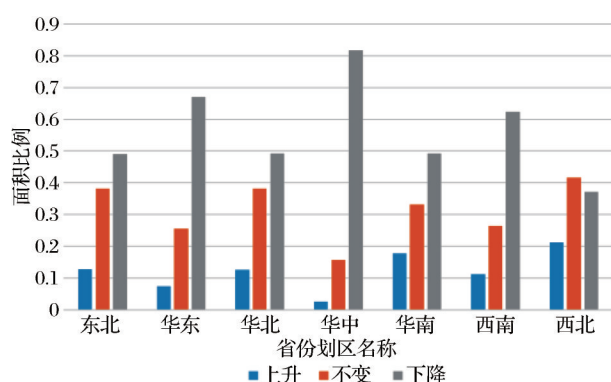


图10 2008~2016中国省份七大区AOD上升、不变和下降的面积比例统计图

Fig.10 Statistical graph of the area ratio of AOD rising, unchanged and decreasing in the seven regions of China's provinces in 2008~2016

华北、东北、华南地区下降的面积比例略高于不变的面积比例,华北地区在国家重点治理下初见成效,大部分面积AOD不再上升,但由于污染现状

严重,还在逐步治理改善之中。东北地区处于中国北部,受寒冷天气和地形条件限制大。华南地区包括多个旅游城市和科技产业重点发展的城市,旅游人口和外来务工人员数量巨大,其地处中国南方临海,有湿润多雨的气候特点,因此华南地区AOD整体下降情况一般。西北地区以上升和不变为主,该地理区连年多风沙扬尘,且受益地形限制难以扩散,建设发展大西北正在进行,工业生产和人类活动也会使得出现大面积AOD的增长和不变分布。

## 5 结论

本研究对2008~2016年的MODIS MAIAC气溶胶光学厚度数据在中国的适用性进行验证,并从时间尺度和空间尺度上对中国地区进行连续的趋势观测分析。C6的MAIAC反演结果在中国AERONET匹配点上表现良好,C6的MAIAC反演AOD结果适用于中国区域。讨论气溶胶的时空分布,得出以下结论:

(1)从年际尺度上看,2008~2016年间平均AOD值总体呈不断减少的趋势,东南部高值中心变化显著,西北部变化不显著。东南部高值聚集区下降尤为显著,西北部AOD低值区无明显变化或略有上升。

(2)从季节尺度上看,AOD季节变化呈现出春季整体高、夏季中心高、秋冬季水平低的变化特征。各省AOD平均值及各省份划区AOD平均值随季节变化整体趋势相似,整体表现出由春到夏波动上升、随后波动下降的特点。春季AOD平均值最高

值出现在江苏省,夏季和秋季AOD平均值最高值在山东省,冬季AOD平均值最高值在重庆,四季AOD平均值最低值均在青海。

(3)中国AOD总体呈现东南高、西北低、高值中心聚集的空间分布,在空间变化上表现出东部减少且分布集聚,西部增加且分布分散的变化特征。华中、华东及西南地区AOD大面积下降,华北、东北、华南地区下降与不变大致相似,西北地区以上升和不变为主。

#### 参考文献(References):

- [1] Yoram J K, Didier T, Olivier B. A Satellite View of Aerosols in the Climate System[J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 2002, 419(6903): 215-223.
- [2] Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, *et al.* National Assessment Report on Climate Change( I ): History and Future Trends of China's Climate Change[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 1-5. [丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告( I ): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 1-5.]
- [3] Xue Y, He X W, Gerrit D L, *et al.* Long-time Series Aerosol Optical Depth Retrieval from AVHRR Data over Land in North China and Central Europe[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198(1): 471-489.
- [4] Sayer A M, Munchak L A, Hsu N C, *et al.* MODIS Collection 6 Aerosol Products: Comparison between Aqua's eDeep Blue, Dark Target, and 'Merged' Datasets, and Usage Recommendations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(24): 13965-13989.
- [5] He Q Q, Gu Y F, Zhang M. Spatiotemporal Patterns of Aerosol Optical Depth Throughout China from 2003 to 2016[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 653(FEB.25): 23-35.
- [6] He Q Q, Zhang M, Bo H. Spatio-temporal Variation and Impact Factors Analysis of Satellite-based Aerosol Optical Depth over China from 2002 to 2015[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 129: 79-90.
- [7] Guan Jiabin, Li Chengcai. Spatial Distributions and Changes of Aerosol Optical Depth over Eastern and Central China[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2010, 46(2): 185-191. [关佳欣, 李成才. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(2): 185-191.]
- [8] Zhao Shiwei, Gao Xiaoqing. Analysis of Spatio Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the North-West of China by MODIS C6 Product[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2637-2646. [赵仕伟, 高晓清. 利用MODIS C6数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(7): 2637-2646.]
- [9] Liu Zhuang, Sun Xiliang, Liu Dan, *et al.* Temporal and Spatial Characteristics of Aerosol Optical Thickness in Northern Provinces of China from 2001 to 2017[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 38(8): 225-232. [刘状, 孙曦亮, 刘丹, 等. 2001~2017年中国北方省份气溶胶光学厚度的时空特征[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(8): 225-232.]
- [10] Liu Haizhi, Guo Haiyan, Ma Zhenfeng, *et al.* Spatiotemporal Distribution and Change Trend of Aerosol Optical Thickness in China from 2001 to 2017[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 3886-3897. [刘海知, 郭海燕, 马振峰, 等. 2001~2017年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 3886-3897.]
- [11] Li L F, Franklin M, Girguis M, *et al.* Spatio Temporal Imputation of MAIAC AOD Using Deep Learning with Downscaling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237(1): 111584.
- [12] Lyapustin A, Wang Y, Korkin S, *et al.* MODIS Collection 6 MAIAC Algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(10): 5741-5765.
- [13] Wei Haining, Wang Weizhen, Xu Feinan, *et al.* Verification and Application of Himawari-8 Aerosol Products[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(5): 1005-1015. [韦海宁, 王维真, 徐菲楠, 等. Himawari-8气溶胶产品的验证及应用[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(5): 1005-1015.]
- [14] Zhang Z Y, Wu W L, Fan M, *et al.* Evaluation of MAIAC Aerosol Retrievals over China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 202(APR.): 8-16.
- [15] Martins V S, Lyapustin A, De Carvalho L A S, *et al.* Validation of High-resolution MAIAC Aerosol Product over South America[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(14): 7537-7559.
- [16] Li Zhipeng, Chen Jian. Research on the Remote Sensing Inversion of Atmospheric Fine Particle PM<sub>2.5</sub> based on GOCI Satellite and Its Spacetime Distribution Law [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(1): 163-173. [李志鹏, 陈健. 基于GOCI卫星的大气细颗粒物PM<sub>2.5</sub>的遥感反演及其时空分布规律研究[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(1): 163-173.]
- [17] Bilal M, Nichol J E. Evaluation of the NDVI based Pixel Selection Criteria of the MODIS C6 Dark Target and Deep Blue Combined Aerosol Product[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, (8): 1-6.
- [18] Huang X D, Deng J, Wang W, *et al.* Impact of Climate and Elevation on Snow Cover Using Integrated Remote Sensing Snow Products in Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 274-288.
- [19] He Xin, Zhou Ru, Yao Yuan, *et al.* Variation Characteristics of Aerosol Types at Typical Sites in China based on AERONET [J]. *Environmental Science in China*, 2020, 40(2): 485-496. [贺欣, 周茹, 姚媛, 等. 基于AERONET的中国地区典型站点气溶胶类型变化特征[J]. *中国环境科学*,



- 2020, 40(2):485-496.]
- [20] Wu Kun. Research on Global Aerosol Optical Thickness Inversion Algorithm [D]. Jilin: Liaoning Normal University, 2019.[武昆. 全球气溶胶光学厚度反演算法研究[D]. 吉林: 辽宁师范大学, 2019.]
- [21] Ghanem D, Zhang J. "Effortless Perfection;" Do Chinese Cities Manipulate Air Pollution Data?[J]. Journal of Environmental Economics & Management, 2014, 68(2):203-225.

## Validation and Spatiotemporal Analysis of MODIS Multi-angle Atmospheric Calibration Aerosol Products in China from 2008 to 2016

Wang Haotian, Wang Yuan, Yuan Qiangqiang

(School of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Exploring the distribution and change characteristics of atmospheric aerosols across the country and accurately understanding the optical characteristics of aerosols in China are very important for studying atmospheric environmental pollution and coping with global climate change. The applicability of the MODIS MAIAC aerosol optical thickness data from 2008 to 2016 in China was verified, and the Mann-Kendall method was used to analyze the spatiotemporal characteristics of AOD values in China from different spatiotemporal scales and aerosol types. The results show that: ① The verification shows that the C6 MAIAC inversion results perform well on the Chinese AERONET matching point, and the C6 MAIAC inversion AOD results are applicable to the Chinese region; ② From the perspective of seasonal scale, the seasonal change of AOD is characterized by high overall spring, high summer center, and low autumn and winter levels. The average AOD of each province and the average AOD of each province are similar with seasonal changes. ③ Spatially, AOD is characterized by high southeast, low northwest, and high value centers. ④ The change of AOD in China as a whole shows the characteristics of decreasing and agglomeration in the east and increasing and scattered in the west. It can further explore the distribution of different types of aerosols and the relationship between aerosols and typical atmospheric pollutants, with a view to providing better decision-making guidance for environmental pollution control in China.

**Key words:** MODIS MAIAC; Aerosol optical thickness; Spatiotemporal distribution; Trend analysis; China region