

田宏伟. 2006—2016年河南省气溶胶光学厚度时空分布[J]. 干旱气象, 2018, 36(1):104-109, [TIAN Hongwei. Spatial-temporal Distribution Characteristics of Aerosol Optical Depth in He'nan Province from 2006 to 2016[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(1):104-109], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-01-0104

## 2006—2016年河南省气溶胶 光学厚度时空分布

田宏伟<sup>1,2</sup>

(1. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003; 2. 中国气象局  
河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 河南 郑州 450003)

**摘要:**选择近11 a(2006—2016年) Aqua MODIS 3 km 气溶胶光学厚度(AOD)产品进行数据提取、空间校正、拼接裁剪和重采样等预处理,得到河南区域资料,在此基础上研究河南省气溶胶光学厚度时空分布特征。结果表明:近11 a 河南省平均AOD值在0.586~0.619之间波动,2007年AOD值最高,2007年之后呈波动下降趋势,年均下降0.0015;AOD季节平均值夏季最大、春季次之、冬季最小;四个季节AOD近11 a均呈波动下降趋势,其中夏季年际变化幅度最大、春秋次之,冬季年际波动幅度较小;南海夏季季风指数对夏、秋两季的AOD波动有明显影响,其中2006—2011年,季风指数和AOD变化趋势相反,而2011—2016年两者变化趋势一致;AOD月均值呈中间高、两边低的周期性变化;河南省AOD年均值空间分布呈北高南低、东高西低的分布形态,高值区主要位于黄河沿岸的三角形区域内,春季、夏季和秋季AOD分布形态与年均值类似,而冬季高值区主要分布在东南部;近11 a 全省AOD年均值变化在北部、东部、东南部地区以增加为主,其余地区以减小为主;2011—2016年变化以减小为主,仅北部新乡、安阳、濮阳等地增加。

**关键词:**气溶胶光学厚度;时空分布;南海夏季季风指数

**文章编号:**1006-7639(2018)01-0104-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-01-0104

**中图分类号:**X16

**文献标志码:**A

### 引言

大气气溶胶通常是指悬浮在大气中直径小于100  $\mu\text{m}$  的液态和固态颗粒总称,由于其可以散射和吸收太阳短波辐射以及地球长波辐射,影响地气系统的辐射平衡(直接效应),并且可以作为凝结核影响云的辐射特性以及作为反应表面影响大量化学反应的速度(间接效应),因此,大气气溶胶在大气辐射和气候变化的研究中占有重要地位<sup>[1]</sup>。气溶胶是研究全球气候和大气环境的一个关键因子,而这些研究都依赖于气溶胶大范围长时间的时空分布和变化的分析<sup>[2]</sup>。作为气溶胶最基本的光学特性之一,气溶胶光学厚度(AOD)是气溶胶气候效应研究的基础<sup>[3-5]</sup>。

AOD作为大气气溶胶最重要的参数之一,是表

征大气浑浊度或大气中气溶胶总含量的重要物理量。目前获取大气气溶胶光学厚度资料的手段包括地基遥感和卫星遥感<sup>[6-9]</sup>。与地基遥感相比,卫星遥感具有连续、动态、宏观、快速的优势,为获取大范围的时空覆盖、变化趋势及气溶胶输送源的信息提供了强有力的监测手段<sup>[10]</sup>。而国内外学者基于卫星遥感数据对大范围区域AOD进行了大量研究,如罗宇翔等<sup>[11]</sup>利用MODIS资料研究了中国大陆2001—2010年AOD年和季节分布特征;刘浩等<sup>[12]</sup>基于2000—2013年MODIS AOD产品分析了京津冀晋鲁区域的AOD空间分布和变化特征,并指出2008年后该区域AOD呈明显下降趋势;李本纲等<sup>[13]</sup>利用MODIS数据和AERONET数据分析了北京市气溶胶的时空变化及不同季节粒径的分布特征。

**收稿日期:**2017-07-13; **改回日期:**2017-12-05

**基金项目:**中央引导地方科技发展项目“中原城市群大气复合污染综合防控技术集成与应用示范”(HN2016-149)和河南省气象局科研计划项目“基于气溶胶光学厚度的PM<sub>2.5</sub>质量浓度遥感反演研究”(KQ201735)共同资助

**作者简介:**田宏伟(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事农业遥感及环境气象方面的研究. E-mail: thwenigma@163.com。

中国区域 AOD 主要有 3 个高值区:第 1 个位于华北平原的河南、山东、江苏及安徽北部;第 2 个位于四川盆地;第 3 个位于新疆沙漠周边地区<sup>[11]</sup>。根据许潇锋等<sup>[14]</sup>和宗雪梅等<sup>[15]</sup>研究结果,郑州是全国 AOD 最高的城市之一,而前期区域性研究多集中在京津冀、长三角等经济发达地区<sup>[16-17]</sup>,对中部地区则关注较少,且中部地区有其独特的气候特征和经济结构,其 AOD 时空分布及变化特征与其他地区有一定区别。河南省地处华北平原南部,是全国农产品主产区和重要的矿产资源大省,近年来随着经济快速增长,大气环境质量形势严峻,2015 年全国 74 个城市空气质量排名中,郑州排名倒数第 5,而河南北部焦作、新乡等城市空气质量水平与郑州也较为接近。本研究拟利用河南省区域 2006—2016 年 MODIS AOD 资料分析其空间分布特征及变化趋势,为其经济发展及环境治理提供科学依据。

## 1 资料及方法

MYD04\_3K (MODIS Aqua Aerosol 5 - Min L2 Swath 3 km) 是 NASA 发布的 Level 2 级气溶胶产品,采用在半干旱植被覆盖较好地区适用性更好的暗像元算法<sup>[18]</sup>,反演全球海洋和陆地环境的大气气溶胶光学厚度,空间分辨率为 3 km<sup>[19]</sup>,更适用于较小区域的研究。选择近 11 a (2006—2016 年) Aqua MODIS 3 km 550 nm AOD 产品进行数据提取、空间校正、拼接裁剪和重采样等预处理,得到河南区域资料,进行时空分布研究。

为验证 MODIS 产品的精度,选取基于 CE318 太阳光度计资料反演的 2008 年郑州地区 AOD (由于 CE318 太阳光度计无 550 nm 波段,采用 Angström 关系式<sup>[20]</sup>得到太阳光度计 550 nm AOD),与同时段郑州地区 MODIS AOD 进行对比,共得到有效数据 46 组,图 1 为两者散点图,数据显示两者相关系数  $r$  达到 0.79 (通过 0.01 显著性水平),且斜率接近 1,因此 MODIS AOD 产品的精度可以满足本文研究需求。

## 2 结果与分析

### 2.1 区域 AOD 时间变化特征

图 2 为河南省 AOD 年平均值和季节平均值的年际变化。2006—2016 年河南省年平均 AOD 值在 0.586~0.619 之间,11 a 平均值为 0.606,高于京津冀晋鲁区域 (0.488)<sup>[12]</sup>,与长江流域第 3 阶梯 (0.59) 处于同一水平<sup>[16]</sup>。河南省 AOD 值 2007 年最高,2016 年最低,呈波动下降趋势,年均下降 0.001 5,说明近 11 a 河南省大气环境质量总体在好

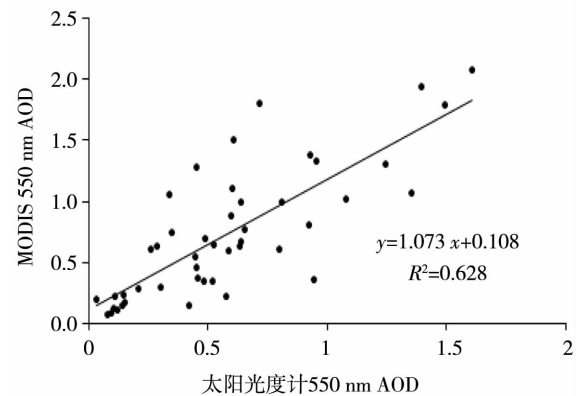


图 1 MODIS AOD 产品和太阳光度计 AOD 散点图

Fig. 1 The scatter diagram of MODIS AOD product and AOD derived from the CE318 sun photometric

转。近 11 a 河南省 AOD 年平均值波动呈双峰分布,2006—2007 年从 0.603 上升至 0.619,之后在 2009 年下降至 0.598,2011 年又缓慢升至 0.617,2011 年之后逐年下降,2011—2016 年年均下降 0.006 2,近 6 a 整体空气质量提高加快。

季节 AOD 变化显示,河南省 AOD 夏季最大,春季次之,冬季最小,与京津冀地区类似,但长江流域 AOD 春季最大,夏季次之,秋季最小<sup>[16]</sup>,说明南方和北方的气候特点对 AOD 的影响机理是不同的:长江流域水汽丰沛,但夏季降水更多,有利于气溶胶颗粒的快速沉降;北方地区夏季水汽较为充沛,但降水比南方偏少,无法对气溶胶有效清除,另外丰沛的水汽配合较高的气温有利于二次气溶胶的生成。

春季 AOD 变化与年平均变化类似,也呈双峰特征,第 1 波峰在 2006 年 (0.742),第 2 波峰在 2012 年 (0.721)。2006—2016 年 AOD 年均降低 0.011,其中 2012—2016 年年均降低 0.026。河南省地处华北平原南部,属大陆性季风气候,春季气候干燥,风速也比较大,有利于本地扬尘天气的产生,这是春季 AOD 较大的原因之一。

夏季 AOD 年际波动较为剧烈,呈 3 峰特征,第 1 波峰在 2007 年 (0.889),第 2 波峰在 2011 年 (1.002),第 3 波峰在 2014 年 (0.806)。2006—2016 年 AOD 年均降低 0.024,其中 2006—2011 年呈升高趋势,年均升高 0.039,2011—2016 年呈下降趋势,年均降低 0.077。夏季华北地区气温和湿度都比较高,有利于二次粒子的生成,且混合层厚度较高,水溶性气溶胶吸湿膨胀也是夏季 AOD 值最高的原因之一<sup>[4]</sup>。2014 年的峰值可能与历史罕见的夏旱有关,2014 年夏季河南省降水比常年偏少 44%,降水的减少导致气溶胶湿沉降偏弱,而晴朗天气的

高温也有利于二次气溶胶的生成和垂直抬升。另外河南是农业大省,夏季作为冬小麦收获季节,农民有露天焚烧小麦秸秆的习惯,秸秆焚烧活动会排放大量的污染物<sup>[21]</sup>,也会加剧 AOD 值的升高,而近年来河南省在秸秆禁烧工作中取得的成效在夏季 AOD 波动中也有一定的显现。

秋季 AOD 年际变化幅度也较为剧烈,但不如夏季,2006—2016 年呈缓慢下降趋势,年均下降 0.003,下降幅度在四个季节中最小,而且没有明显的连续下降或上升阶段。2006 年、2013 年、2016 年等秋季波动的波峰处,对应的是夏季波动的波谷,而在 2008 年和 2014 年秋季的波谷处,对应的是夏季的波峰。

冬季 AOD 为四季最小,2006—2016 年平均值为 0.424,其间呈上升、下降、再上升、下降的波动变化,年均下降 0.004。第 1 波峰在 2007 年(0.438),第 2 波峰在 2011 年(0.487),2011—2016 年年均下降 0.029。近年来北方地区冬季经常有大范围持续性雾霾事件发生,而且持续性雾霾多发生在云量较大、风速较小等扩散条件较差的天气条件下,当雾霾达到一定程度后,不符合暗像元判别条件,无法反演 AOD;而冬季冷空气活动强,向华北地区输送大量清洁空气,冷空气过境后的晴好天气可以反演 AOD,因此冬季 AOD 并不能完全反映实际污染水平。

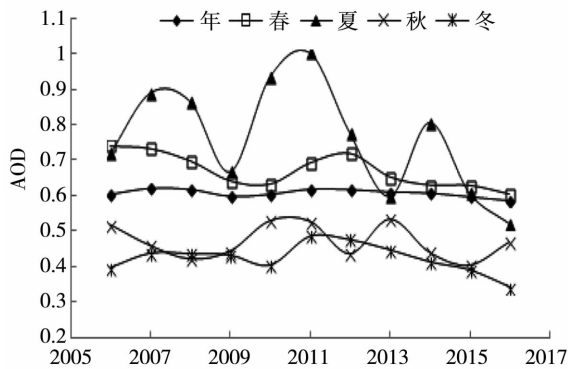


图2 2006—2016 年河南省 AOD 年平均和季节平均值的年际变化

Fig. 2 Yearly variation of annual and seasonal averaged AOD in He'nan Province during 2006 - 2016

图3 显示 2006—2016 夏季和秋季 AOD、南海夏季季风指数、9 月季风指数的年际变化。2006—2011 年,季风指数和 AOD 变化趋势相反;2011—2016 年,两者变化趋势相同。南海季风对 AOD 时空分布的影响机理尚需进一步研究。

图4为河南省AOD月均值变化。河南省AOD

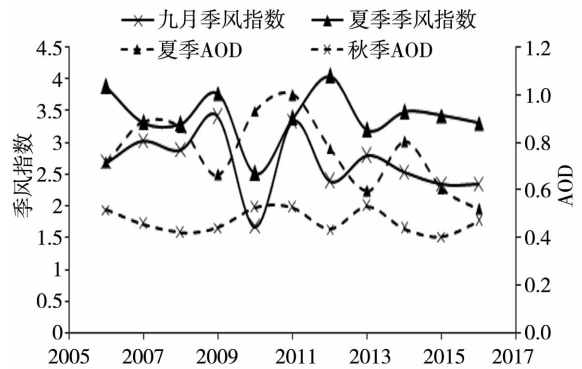


图3 2006—2016 年南海夏季季风指数与夏秋季河南省 AOD 年际变化

Fig. 3 The interannual variation of AOD in summer and autumn in He'nan Province and South China Sea summer monsoon index during 2006 - 2016

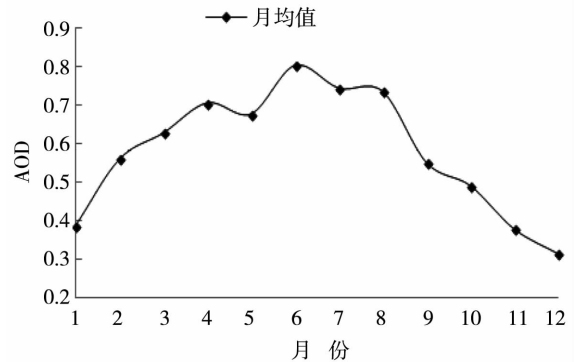


图4 河南省 AOD 月际变化

Fig. 4 Monthly variation of AOD in He'nan Province

月均值呈中间高两边低的周期性波动走势。1—4 月 AOD 值逐步升高;5 月略有下降;6 月升到全年最高(0.803),超过了气温和湿度更高的 7 月和 8 月;7 月和 8 月基本持平;9 月以后逐步下降。6 月为河南省冬小麦收获季节,每年都有大量露天焚烧秸秆现象发生,是 6 月 AOD 全年最高的原因之一。

### 2.2 AOD 空间变化特征

图5为2006—2016年河南省AOD年均值和季节均值的空间分布。AOD 年均值空间分布显示河南省 AOD 北部高于南部,东部高于西部。高值区主要分布在黄河沿岸的三角形区域内,AOD > 0.8 的地区主要为新乡、焦作、郑州和开封北部、鹤壁南部。低值区主要分布在西北沿太行山一线、西部伏牛山区和南部桐柏山一线。中东部的许昌、漯河、周口、商丘等地也有一部分 AOD > 0.8 的像元。河南省中北部和中部的漯河、许昌一带是省内经济比较发达的地区,工矿企业较多,本地污染物排放量大,对应的 AOD 年均值也较周边偏高,说明本地污染源对 AOD 的升高起主要作用。河南北部与污染较重的

河北南部及山东西部<sup>[6]</sup>接壤,在北方冷空气自北向南推进时会有大量污染物向南传输,对河南北部地区 AOD 有一定的影响。

春季和夏季 AOD 空间分布特征与年平均相似,数值夏季最高,春季次之,均高于年均值,春季新乡、焦作及郑州和开封的沿黄河一带 AOD > 1.0,而东部、北部及信阳、南阳的大部分地区 AOD > 0.8。夏季黄河沿岸及焦作东部、新乡西部 AOD > 1.2,安阳、鹤壁、洛阳北部、郑州北部等地 AOD > 0.8, AOD < 0.6 的低值区面积更小,仅出现在洛阳、三门峡和南阳交

界山区。虽然春夏两季空间分布相似,但形成的机理又有所区别,春季北方多风沙活动,较大风速有利于本地扬尘产生,扬尘属于粒径较大的一次粒子,沉降更快;而夏季受高温高湿影响,粒径小、沉降更慢的二次粒子比例更高,因此夏季 AOD 总体水平全年最高。

秋冬季河南省 AOD 均值都比较小, AOD > 0.8 的像元仅有少数零星分布。秋季 AOD > 0.6 高值区主要分布在河南省北部及东部,沿黄河有零星大于 0.8 的像元分布。冬季 AOD > 0.6 高值区主要分布

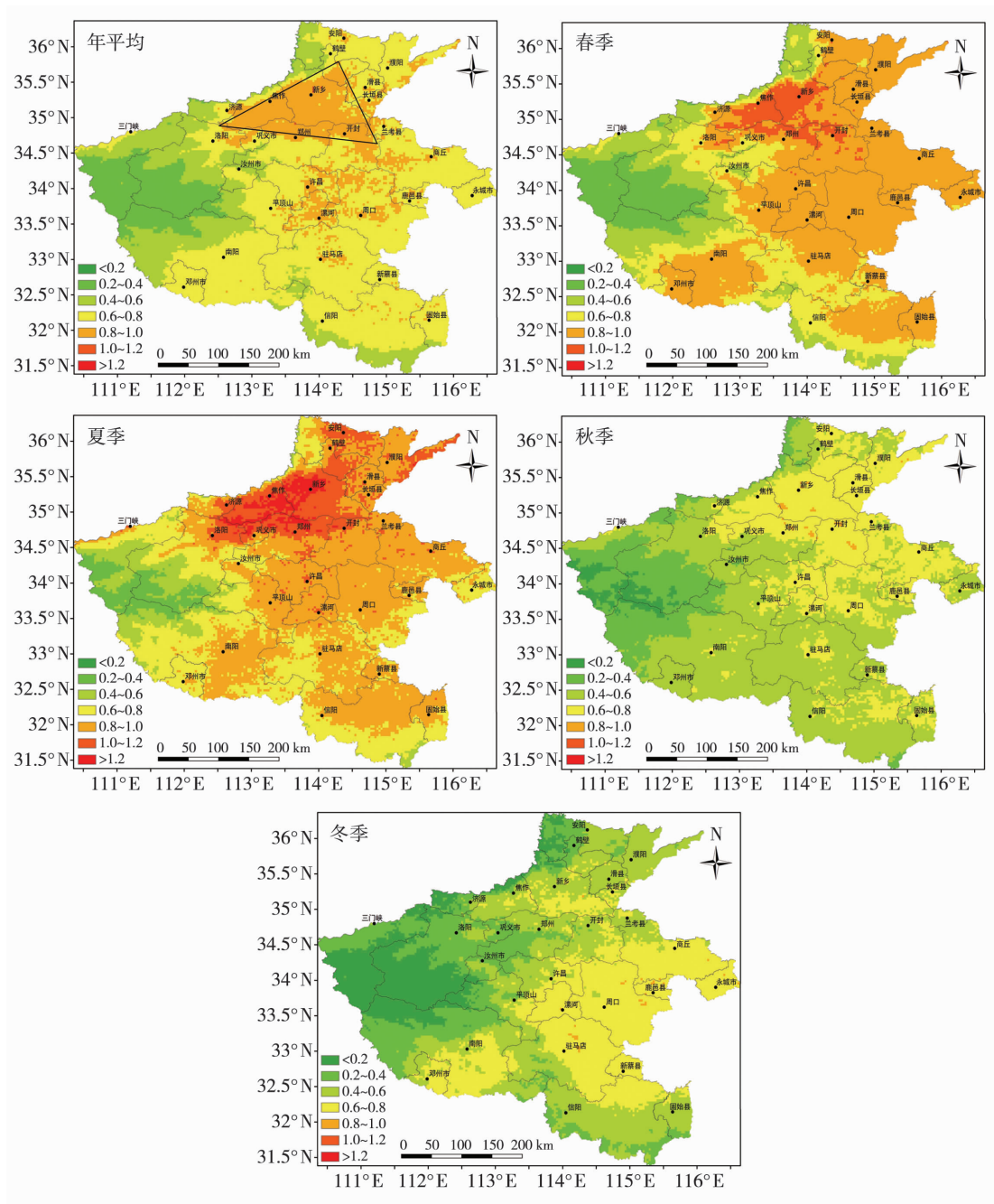


图 5 2006—2016 年河南省 AOD 年均和四季空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual and seasonal average AOD during 2006 – 2016 in He'nan province

在东部及南部, AOD > 0.8 像元主要分布在周口、驻马店等地。冬季河南省盛行偏北风, 我国大陆上空水汽含量呈东南向西北递减趋势<sup>[22]</sup>, 东北风虽然会输送较多污染物, 但空中水汽资源相比西北风较为丰沛, 在云层较厚条件下不符合 AOD 反演条件, 而西北风较为干燥, 高压过境后的晴好天气符合 AOD 反演条件。西北风常将西北部污染物输送到东南部, 而山西、陕西两省的污染物由于太行山的阻挡很难传输到河南, 所以冬季 AOD 高值区更加偏东南。

图 6 为 2006—2016 和 2011—2016 年 AOD 年均值倾向率空间分布。近 11 a AOD 年均值倾向率

空间分布[图 6(a)]显示, 全省大部分地区倾向率在  $-0.01 \sim 0.01$  之间, 其中新乡、焦作、安阳、鹤壁、商丘、周口东南部、驻马店东北部等地存在大片 AOD 值增大的区域, 濮阳、三门峡、洛阳、漯河、信阳等地存在大片 AOD 值减小的区域。在河南省北部新乡、焦作有片状 AOD 显著增加(倾向率大于 0.01)的像元, 商丘、周口、郑州、开封等地存在零星的 AOD 显著增加的像元。近 6 a(2011—2016 年) AOD 年均值倾向率空间分布[图 6(b)]显示, 除濮阳、安阳、鹤壁、新乡等地外, 其他地区 AOD 以减小为主, 其中东南部信阳、驻马店、周口、漯河等地倾向率小于  $-0.01$ 。

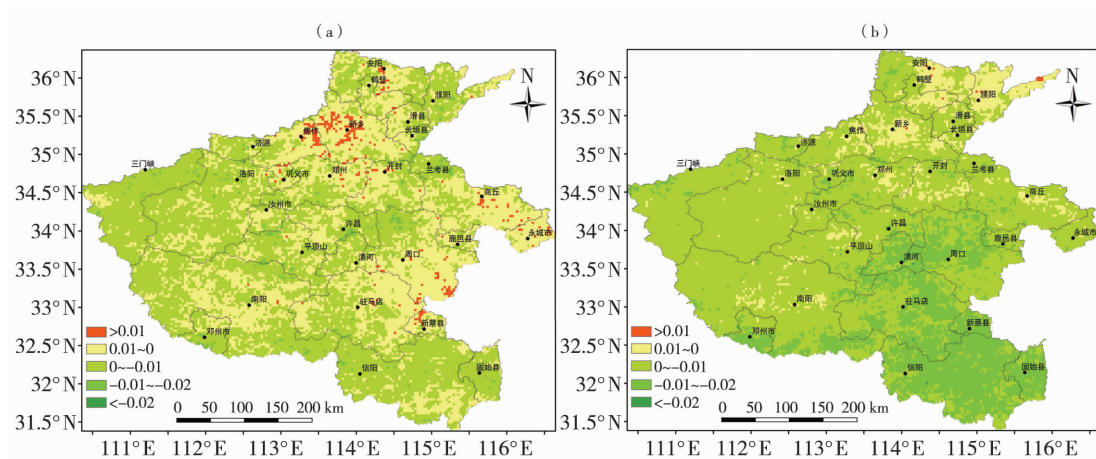


图 6 2006—2016 年(a)和 2011—2016 年(b) AOD 年均值倾向率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of climate tendency for annual average AOD during 2006–2016 (a) and 2011–2016 (b)

### 3 结论与讨论

(1) 2006—2016 年河南省年平均 AOD 值在 0.586~0.619 之间, 11 a 平均值为 0.606, 2007 年为一峰值, 2007 年之后呈波动下降趋势, 年平均递减率为 0.001 5。各季节 AOD 以夏季最大、春季次之、冬季最小。

(2) 2006—2016 年四季 AOD 均呈波动下降趋势, 其中夏季年际变化幅度最大、春季次之、冬季最小。南海夏季风指数对夏、秋两季的 AOD 波动有明显影响, 其中 2006—2011 年, 季风指数和 AOD 变化趋势相反, 而 2011—2016 年两者变化趋势一致。

(3) 2006—2016 年全省 AOD 年均值倾向率在  $-0.01 \sim 0.01$  之间, 其中北部、东部、东南部地区以增加为主, 其余地区以减小为主。2011—2016 年变化以减小为主, 仅北部新乡、安阳、濮阳等地增加。AOD 月均值呈中间高, 两边低的周期性波动变化。

(4) 河南省 AOD 年均值空间分布呈北高南低、东高西低的分布形态, 高值区主要位于黄河沿岸的

三角形区域内。春季、夏季和秋季分布形态与年均值类似, 而冬季高值区主要分布在东南部。

气溶胶在大气辐射中的信号是非常微弱的, 因此其光学厚度的反演条件非常苛刻, 在云覆盖条件下无法有效反演, 即使没有云覆盖, 当雾霾较为严重时, 云检测算法也很难将雾霾与云区别开来, 因此 AOD 并不能完全代表一个地方的气溶胶污染程度。另外, 气溶胶的时空变化受地表覆盖、气象条件、人类活动等多重因素的影响, 而这些因素又在动态变化之中, 因此未来需要综合多种要素分析其时空变化特征。

#### 参考文献:

- [1] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826–840.
- [2] LIU J, ZHENG Y, LI Z, et al. Ground-based remote sensing of aerosol optical properties in one city in Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2008, 89(1/2): 194–205.
- [3] 赵小锋, 叶红. 热岛效应季节动态变化随城市化进程演变的遥感监测[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1817–1821.

- [4] 宋薇,张镭. 大气气溶胶光学厚度遥感研究概况[J]. 干旱气象,2007,25(3):76-81.
- [5] 周旭,张镭,孙乃秀,等. 一次沙尘天气过程中沙尘气溶胶对辐射的影响[J]. 干旱气象,2016,34(5):763-771.
- [6] 李成才,毛节泰,刘启汉,等. 利用 MODIS 研究中国东部气溶胶光学厚度的分布特点和季节变化特征[J]. 科学通报,2003,48(19):2094-2100.
- [7] 王跃思,辛金元,李占清,等. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测(2004-08~2004-12)[J]. 环境科学,2006,27(9):1703-1711.
- [8] 周碧,张镭,蒋德明,等. 利用激光雷达观测资料研究兰州气溶胶光学厚度[J]. 干旱气象,2013,3(4):666-671.
- [9] 史晋森,田鹏飞,周天,等. 河西走廊农业区春季气溶胶光学特性[J]. 干旱气象,2015,33(1):38-44.
- [10] MENG F, CAO C, SHAO X. Spatial-temporal variability of Suomi-NPP VIIRS-derived aerosol optical thickness over China in 2013[J]. Remote Sensing of Environment, 2015,163:61-69.
- [11] 罗宇翔,陈娟,郑小波,等. 近10年中国大陆MODIS遥感气溶胶光学厚度特征[J]. 生态环境学报,2012,21(5):876-883.
- [12] 刘浩,高小明,谢志英,等. 京津冀晋鲁区域气溶胶光学厚度的时空变化特征[J]. 环境科学学报,2015,35(5):1506-1511.
- [13] 李本纲,冉阳,陶澍. 北京市气溶胶的时间变化与空间分布特征[J]. 环境科学学报,2008,28(7):1425-1429.
- [14] 许潇锋,邱金桓,牛生杰,等. 近45年中国12个一级站大气气溶胶光学厚度变化特征[J]. 环境科学学报,2009,29(3):488-495.
- [15] 宗雪梅,邱金桓,王普才. 近10年中国16个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析[J]. 气候与环境研究,2005,10(2):201-208.
- [16] 白淑英,史建桥,卜军,等. 近年来长江流域气溶胶光学厚度时空变化特征分析[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1567-1573.
- [17] 张春桂,彭云峰,林晶,等. 福建三大城市群气溶胶遥感监测及时空变化分析[J]. 气象,2010,36(8):92-99.
- [18] 胡蝶,张镭,沙莎,等. 西北地区MODIS气溶胶产品的对比应用分析[J]. 干旱气象,2013,31(4):677-683.
- [19] 孙晓雷,甘伟,林燕,等. MODIS 3 km 气溶胶光学厚度产品检验及其环境空气质量指示[J]. 环境科学学报,2015,35(6):1657-1666.
- [20] ECK T F, HOLBEN B N, REID J S, et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols[J]. J Geophys Res, 1999,104(D24):31333-31350.
- [21] 郑有飞,田宏伟,陈怀亮,等. 河南省夏季秸秆焚烧污染物排放量的估算与分析[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8):1590-1594.
- [22] 彭艳秋,王卫国,王煜,等. 利用不同资料研究我国大陆上空柱水汽含量[J]. 应用气象学报,2012,23(1):59-68.

## Spatial-temporal Distribution Characteristics of Aerosol Optical Depth in He'nan Province from 2006 to 2016

TIAN Hongwei<sup>1,2</sup>

(1. He'nan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China;

2. He'nan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique of CMA, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** To study the spatial-temporal distribution characteristics of aerosol optical depth (AOD) over He'nan Province, the AOD product with 3 km resolution during 2006-2016 from Aqua MODIS was pretreated including data extraction, spatial correction, splice cutting and resampling, and the AOD values over He'nan region were obtained, on this basis, the spatial and temporal distribution characteristics of average AOD in He'nan were analyzed. The results show that the annual average AOD almost ranged from 0.586 to 0.619, and reached the peak in 2007, then fluctuated downward with a slope of  $-0.0015$  per year. The seasonal variation of the AOD average value fluctuated downward, which showed the largest change range in summer, second in spring and the smallest in winter. South China Sea summer monsoon index (SCSSMI) had significant influence on AOD inter-annual variability, SCSSMI showed an opposite trend during 2006-2011 and consistent trend during 2011-2016 compared with AOD. The monthly variation of AOD value showed the periodic fluctuation with higher value in the middle and lower value in both sides. As for spatial distribution, the multiyear average AOD values were higher in northern and eastern parts and lower in southern and western parts of He'nan Province, the highest AOD value mainly distributed in a triangular area along the Yellow River. The spatial distribution characteristics of mean AOD in spring, summer and autumn were similar to those of annual average values, while the higher value mainly distributed in southeast part of He'nan Province in winter. The change rate in recent 11 years showed increasing in the northern, eastern and southeast parts of He'nan Province, while it showed decreasing in rest parts. The change rate showed increasing only in Xinxiang, Anyang and Puyang in northern part of He'nan Province, while it showed decreasing from 2011 to 2016 in rest parts.

**Key words:** aerosol optical depth; spatial-temporal distribution; South China Sea summer monsoon index