

Temporal and Spatial Distribution of Aerosol Optical Depth in Sichuan and Its Correlation with Meteorological Factors from 2006 to 2016

Tianya Liu, Wenqi Pan, Chenxi Liu, Wentao Zhao, Jiangyan Yang, Yuanmeng Li

School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: 4231045@qq.com

Received: Dec. 3rd, 2019; accepted: Dec. 16th, 2019; published: Dec. 23rd, 2019

Abstract

The paper is based on the product of MODIS AOD 3 km and the observation data of the meteorological station in Sichuan 2006-2016, analyzing the temporal and spatial distribution and variation trend of aerosol optical thickness (AOD). The result showed that the AOD is characteristic of the "M-type" growth trend during the 10 years, including high value years in 2010 and 2013. The monthly mean AOD shows "two-peak type" character, reaching peak in the Spring and Summer in every year. As for the spatial distribution, AOD is characterized by strip-like distribution along the topography, with the western part of the basin decreasing to the east. The high altitude area is a high value area and the low altitude is low value area. In terms of the relationship between AOD and meteorological factors, AOD is significantly correlated with relative humidity, and no significant with speed and precipitation in Sichuan.

Keywords

Sichuan Basin, MODIS, AOD, Aerosol, Temporal and Spatial Distribution, Meteorological Factors

2006~2016年四川盆地气溶胶光学厚度时空变化特征及其气象影响因素分析

刘天雅, 潘文琪, 刘晨曦, 赵雯涛, 杨江艳, 李芾梦

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: 4231045@qq.com

收稿日期：2019年12月3日；录用日期：2019年12月16日；发布日期：2019年12月23日

摘要

本文基于2006~2016年MODIS AOD 3 km产品及四川盆地地面气象站观测资料分析了四川盆地AOD时空分布特征及气象因素相关性分析。结果表明四川盆地2006~2016年在10a间呈“M型”增长趋势，其中2010年和2013年是AOD高值年。AOD月均值呈“双峰型”变化特征，双峰分别位于每年的春季和夏季。四川盆地AOD空间分布特征为，沿地形呈带状分布，盆地西部向东部递减，海拔高地区AOD值小，海拔低地区AOD值大。四川盆地AOD与相对湿度具有相关性，与风速、降水并无明显变化关系。

关键词

四川盆地, MODIS, AOD, 气溶胶, 时空分布, 气象因素

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气气溶胶是悬浮于大气中的固态和液态颗粒物的总称，它包括水滴、冰晶、悬浮着的固体灰尘微粒、烟粒、微生物、植物孢子和花粉以及各种凝结核和带点粒子等，它是低层大气的重要组成成分。大气气溶胶粒子对辐射的吸收和散射，云雾降水的形成，大气污染以及大气光学与电学现象的产生都具有重要的作用[1]。气溶胶的来源可以分为人工源和自然源两大类，通过辐射(直接)效应和微物理(间接)效应两种机制对大气能量和气候变化产生重要影响[2]。随着经济的高速发展，大气污染物的排放也越来越多，全球气候系统(如温度、湿度、水汽压、云量和风速等)的变化对地理环境的干湿状态及区域气溶胶的时空分布产生重要影响(IPCC 第五次评估报告)。作为大气中的主要污染物，气溶胶一方面通过吸收和散射太阳辐射，直接影响地气系统的辐射平衡[1][2]，另一方面还可作为云凝结核，通过改变云的物理和微物理特征影响降水[3]，继而影响全区气候。因此研究四川盆地大气气溶胶时空变化特征及其与气象要素的关系，将了解四川盆地地区大气污染物扩散和传输规律以及气溶胶对降水的影响提供了依据。

对于气溶胶的观测，使用了MODIS提供的2006年~2016年以来3 km AOD(气溶胶光学厚度)产品，卫星数据的使用可以弥补气象观测的不足。气溶胶在大气中存在时间较短，其浓度受到排放源强度、地形条件和气象因素的影响，具有显著的时空变异性，在一定时间和空间范围内进行外场实验所获取的数据，只能提供一些个例研究结果[4]。卫星资料可以提供长时间序列的对地观测数据，使得宏观尺度上评估气溶胶-云-降水间相互影响关系成为了可能。

晏利斌等[5]认为气溶胶光学厚度和云量之间存在显著正相关关系，气溶胶光学厚度的增加使得云滴粒子有效半径的减小而造成云量增多；Nakajima等[6]发现气溶胶光学厚度和云有效半径呈现明显的负相关关系；Tang等[7]发现在陆地上空云滴粒径与气溶胶光学厚度呈正相关，而在海洋上空呈负相关；Mahowald等[8]提出气溶胶与降水之间存在正反馈机制，即气溶胶增加-降水减少-气溶胶更多；Li等[9]以美国南部平原为研究区，发现当云水含量较高时，随着气溶胶浓度的增多，云滴粒子也会增大，继而使得降水增加，而当云水含量较低时，气溶胶浓度的增多，云滴有效半径会变小，从而对降水产生抑制

作用；石睿等[10]通过统计中国四个典型地区夏季气溶胶、云、降水的时空分布特征发现，气溶胶光学厚度与云光学厚度和云水路径呈正相关，在相对湿度较低情况下，与云滴有效粒子半径呈负相关；陈宇[11]针对西北地区春季沙尘和非沙尘天气的统计，发现沙尘天比非沙尘天云滴粒子有效半径减小，而云水路径和光学厚度增大。吴蓬萍等[12]对四川盆地秋季的气溶胶光学厚度和低云云量进行了分析，发现气溶胶会使高云量增加，反之使低云量增加高云量减少。

四川盆地是 AOD 高值区[13]，但是前人对四川盆地 AOD 的研究所采用的数据精确度不高且分析个别城市，对四川盆地整体 AOD 变化趋势与气象要素相关性的研究甚少[14] [15]，因此本文开展了四川盆地 AOD 空间变化趋势的研究及气象要素分析。

2. 研究区域与方法

2.1. 研究区域

四川盆地本身一直是全国气溶胶高值区，且邻接青藏高原东坡，盆地地势平坦，盆地四周地势高度差巨大，具有特殊的地形和环流，导致气溶胶不易扩散，还会聚集来自其它地区的气溶胶[12]此外，四川盆地具有典型的湿热气候，年平均相对湿度达 75%~85%，云雾较多，是全国云量和雾日最多日照最低的地区。

2.2. 数据选取

2013 年 9 月国务院印发《大气污染防治行动计划》，简称大气十条。具体目标为到 2017 年，全国地级以上城市可吸入颗粒物浓度比 2012 年下降 10% 以上。故选时间范围为 2006 年至 2016 年，分析 2013 年颁布大气十条对城市污染物浓度下降是否产生显著影响以及大气十条是否达到其颁布时所定目标。

2.3. 研究方法

本研究拟用 NASA 官方发布的 2006~2016 年中国地区 MODIS AOD 3 km 产品，选区四川盆地作为其研究对象利用 IDL 反演利用四川省地边界矢量裁剪得到相应的 AOD 年、季节空间分布，并通过 ArcMap 软件绘制图形。

MODIS 是搭载于 Terra 和 Aqua 卫星上的一个中分辨率传感器，该装置在 36 个相互配准的光谱捕捉数据，覆盖从可见光到红外波段，可以得到众多的大气物理信息。NASA 发布了 10 km 和 3 km 两种 AOD 产品，其中 10 km 产品采用了常规的暗像元算法，而 3 km 采用深蓝反演算法填充了暗像元算法对亮的目标区域反演盲区。10 km 适用于海洋和暗像元区(例如植被茂密地区)，两种分辨率的 AOD 产品最主要的区别在于反演算法中使用的像元矩阵不同，两种分辨率的反演结果近乎一致[16]。

MODIS AOD 是地表到卫星高度上大气颗粒物对入射太阳光的消失，太阳光度计是从地面直接探测太阳入射光在进入大气层后到达地面的消光，是目前公认的获取近地面气溶胶最准确的探测手段。研究表明多种气溶胶遥感参量与气溶胶光学厚度等均与 PM_{2.5} 存在一定相关性[17]。利用 IDL 和 NASA 官方发布用于处理 MODIS 产品的插件 MCTK (The MODIS Conversion Toolkit)对 MODIS AOD 产品进行投影处理，再结合 ENVI 的 layer Stacking 模块对投影后的多个文件组合成多波段文件，以像素为处理单元计算有效元的均值。

2.3.1. CE318 AOD 数据处理

MODIS AOD 产品是利用暗像元法反演得到的 550 nm 的数据，而 CE318 给出的是 1020 nm、870 nm、670 nm、440 nm 的数据，根据 Angstrom 波长指数公式[18]。

$$\text{AOD}_\alpha = \beta \times \lambda^\alpha \quad (1)$$

选择两个不受水汽影响的波段 870 nm 和 440 nm, 则有:

$$\text{AOD}_\alpha(\lambda_{870}) = \beta \times \lambda_{870}^\alpha \quad (2)$$

$$\text{AOD}_\alpha(\lambda_{440}) = \beta \times \lambda_{440}^\alpha \quad (3)$$

由(2)、(3)可计算得到 α 到 β , 从而得到 550 nm 的 AOD。

2.3.2. 站点数据处理

本研究使用的地面气象资料来自 2006~2016 年四川省主要城市的常规气象观测, 利用 Fortran 计算得出四川省主要气象站点的气象数据年均值, 选取其 AOD 高值期春季和夏季的气象要素年均值。包括空气相对湿度, 平均风速, 降水量。分析四川盆地年际 AOD 变化与气象要素之间联系。

3. 结果与讨论

3.1. 四川盆地 MODIS AOD 均值时空变化特征

3.1.1. 四川盆地 MODIS AOD 均值年际变化

四川盆地 MODIS AOD 2006~2016 年年均值变化趋势如图 1 所示, 十年来 AOD 均值变化在 0.2~1.1 之间其中年平均平均值变化在 0.6~1.1 之间。其中 2016 年年均值最低约为 0.5, 2010 年、2011 年和 2013 年年均值最高约为 0.6。这十年来 AOD 值呈现“M”型变化的趋势, 2007~2010 年增大, 2010 年达到峰值后下降, 2013 年再次达到峰值, 2013~2016 年下降。其中最大减小率出现在 2013~2014 年, 高达 16.6%。2006 年~2013 年 AOD 平均值都维持在 0.5 以上, 2013 年之后 AOD 值逐年下降, 2016 年下降到十年中平均浓度的最低值。虽然 2006 年至 2008 年 AOD 均值浓度有所下降但是下降相对于 2013 年至 2016 年, 其下降趋势并不明显。与此同时 2006 年~2016 年 AOD 均值的最大值和最小值都在 2013 年~2014 年下降趋势明显。

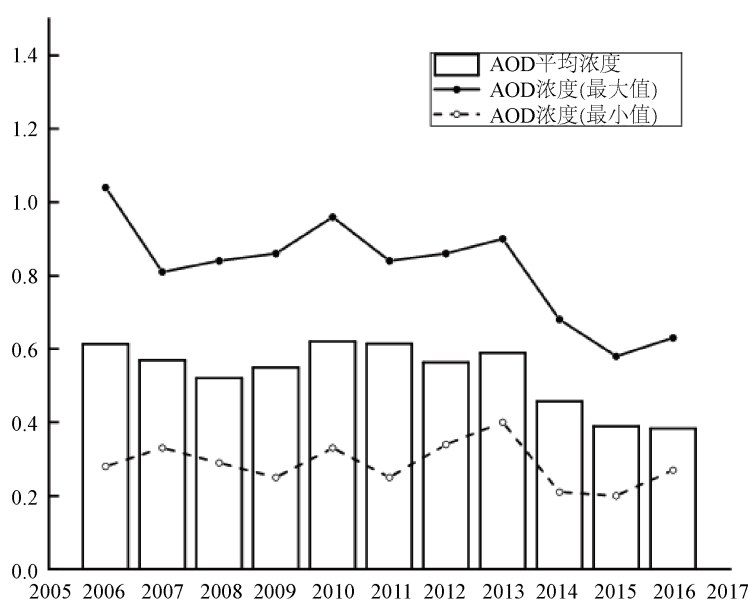


Figure 1. Variation of annual average AOD over Sichuan Basin during 2006 to 2016

图 1. 2006~2016 年四川盆地 MODIS AOD 年均浓度年际变化特征

图 2 为四川盆地 AOD 月均值折线图, 月均值呈双峰形分布, 第一个峰值在每年的春季(3 月~5 月), 第二个峰值在每年夏季(6 月~8 月)且第一个峰值的数值要大于第二个峰值。2006~2016 年十年中, 四川盆地 AOD 值是逐渐变小的, 其峰值也逐渐变小。整体上, 四川盆地春季 AOD 值最大, 夏季次之, 其次为秋季和冬季。其周期表现为 1~3 月逐月增加, 4~7 月逐月下降 8~9 月逐月增加并达到第二个峰值 10~12 月下降。

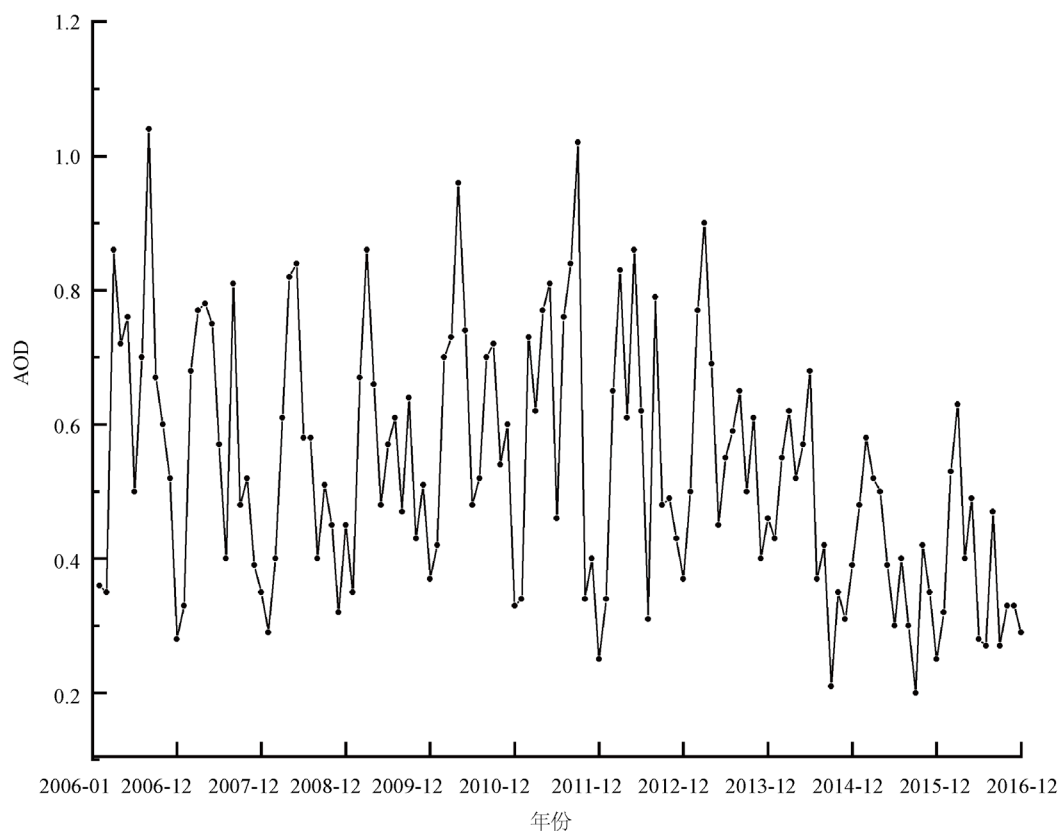


Figure 2. AOD monthly data diagram during 2006-2016

图 2. 四川盆地 AOD 2006~2016 年月均值

3.1.2. 四川盆地 MODIS AOD 均值空间分布特征

由图 3 可见, 四川盆地 AOD 变化趋势为西高东低, 由中部向四周减少的变化特征。这与前人的研究成果一致[19]。AOD 大值区域主要分布在四川盆地中部和东部地区即德阳市-成都市-眉山市-乐山市北, 呈带状分布。由于地形因素的影响, 该城市群位于龙门山脉东侧 AOD 分布有沿山脉走向分布特征。四川南部的川南城市群是第二个 AOD 的高值区域, 由气象站观测资料中川南城市群的风速较小静风频率高故污染物不易扩散。此外川南城市群人口多, 机动车数量大, 机动车排污辆大。位于四川盆地东北部的资阳市、遂宁市、广安市是第三个 AOD 高值区。

整体上来看, 四川盆地整体 AOD 空间分布特征为中部低海拔城市 AOD 值高, 其中以成都市为高值中心(AOD 值 > 0.8); 由成都平原向四周海拔高处逐渐递减, 海拔越高 AOD 值越高。

3.1.3. 四川盆地 MODIS AOD 均值季节特征

图 4 为 2006~2016 年四川盆地 AOD 不同季节(春季: 3~5 月, 夏季: 6~8 月, 秋季: 9~11 月, 冬季 12~2 月) AOD 均值浓度变化情况, 整体来看四季 AOD 值自 2013 年后都呈下降趋势, 和图 1 AOD 年均

变化趋势一致。十年中春季 AOD 值最高其次为夏季，秋冬 AOD 值低，春夏大于秋冬。夏季和秋季的变化趋势一致同样呈 2006~2008 先下降后上升 2010 年达到最大值，2010 年后下降。其中春季在 2013~2014 年下降率最大，下降明显。其他季节 AOD 浓度变化无明显变化规律。春夏 AOD 值高于秋冬 AOD 值的原因是因为夏季以小颗粒的人为气溶胶为主，春季以大颗粒的沙尘气溶胶为主[6]。春夏主要受本地秸秆燃烧和北方沙尘天气影响[20]，夏季四川盆地内气温高，降雨量大，人为排放污染物多，大气中气溶胶粒子在夏季高温高湿的环境下吸收空气中的水汽凝结成核。秋季四川盆地时常会发生华西秋雨，但是相比于夏季，秋季的湿度小，加上降水的湿沉降过程秋季的污染物浓度较小。冬季四川盆地气温低，风速小有时会出现逆温层大气层节稳定常伴有重污染的发生，但冬季的 AOD 高值区表现为局部。

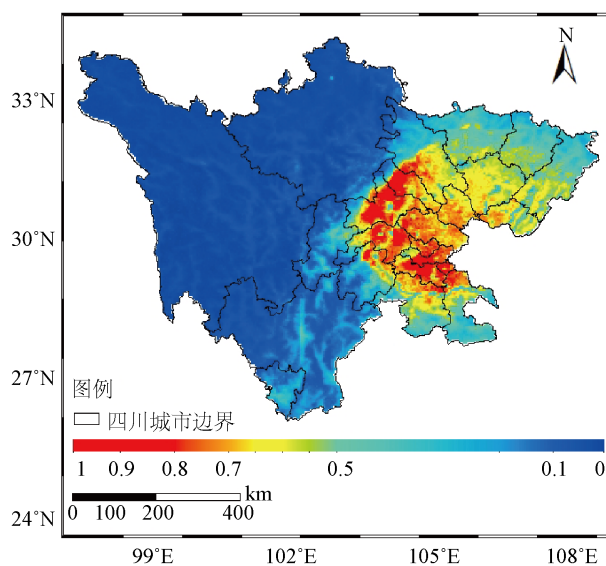


Figure 3. Spatial distribution of AOD in the Sichuan Basin

图 3. 四川盆地 AOD 年均空间分布图

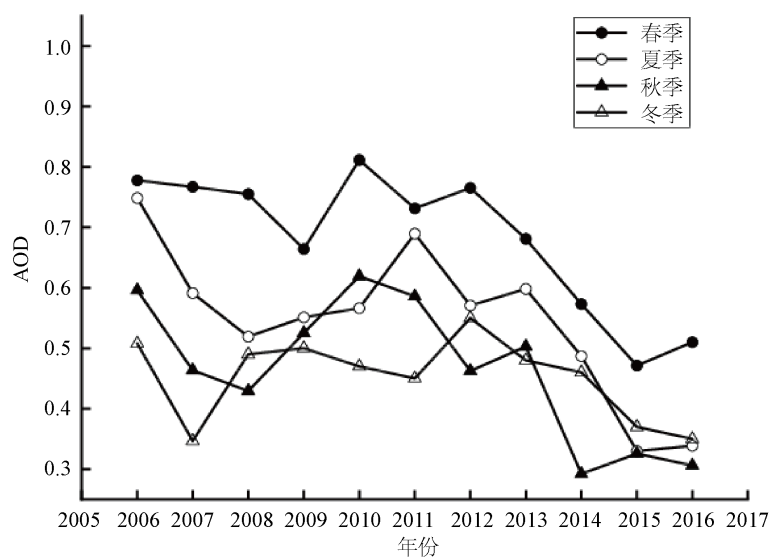


Figure 4. Variation of seasonal average AOD over Sichuan Basin during 2006 to 2016

图 4. 2006~2016 年四川盆地 AOD 季节变化

由图 5 2006~2016 年四川盆地 AOD 四季空间的分布图表现为 AOD 值从大到小依次为春季、夏季、秋季、冬季。其中春季的最大值可达 1.4，高值区分布于四川盆地成都平原和四川南部地区。夏季 AOD 高值区相比春季范围明显减小，高值区位于成都市-德阳市。秋季 AOD 高值区位于四川南部的内江市-自贡市。冬季的 AOD 分布的高值区和夏季高值区相似，但 AOD 值较低。

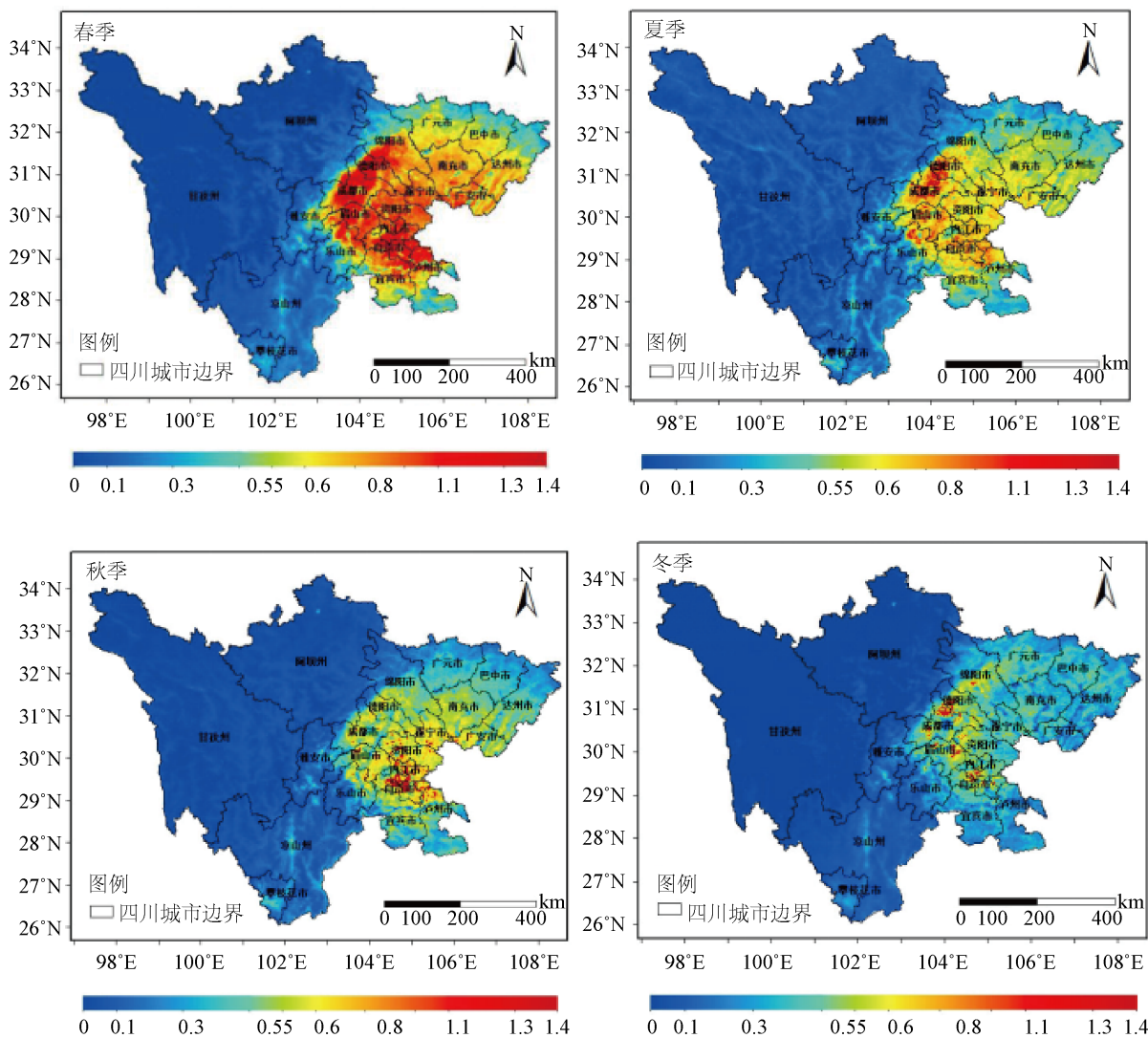


Figure 5. Spatial distribution of seasonal average AOD over Sichuan Basin during 2006 to 2016

图 5. 四川盆地 AOD 季节空间变化图

3.1.4. 四川盆地 MODIS AOD 年际空间变化

图 6 为 2006~2016 年四川盆地 AOD 年均空间变化图，四川盆地 AOD 年际变化大值区出现在四川盆地中部，呈四川盆地中部向四周减少的趋势。2006~2009 年 AOD 年均值逐年减小，其 AOD 高值区位于成都市-德阳市-自贡市，AOD 高值区范围逐渐缩小。2010~2011 年 AOD 逐年增大，高值区范围逐渐增大。2012 年 AOD 高值区范围相较于前几年减小，2013 年 AOD 高值区范围达到最大，AOD 值均值最大，是 2006~2016 年颗粒污染物浓度最大污染最严重的一年。2014~2016 年 AOD 年均值开始减小，至 2016 年 90% 以上四川盆地地区年均值小于 0.55。

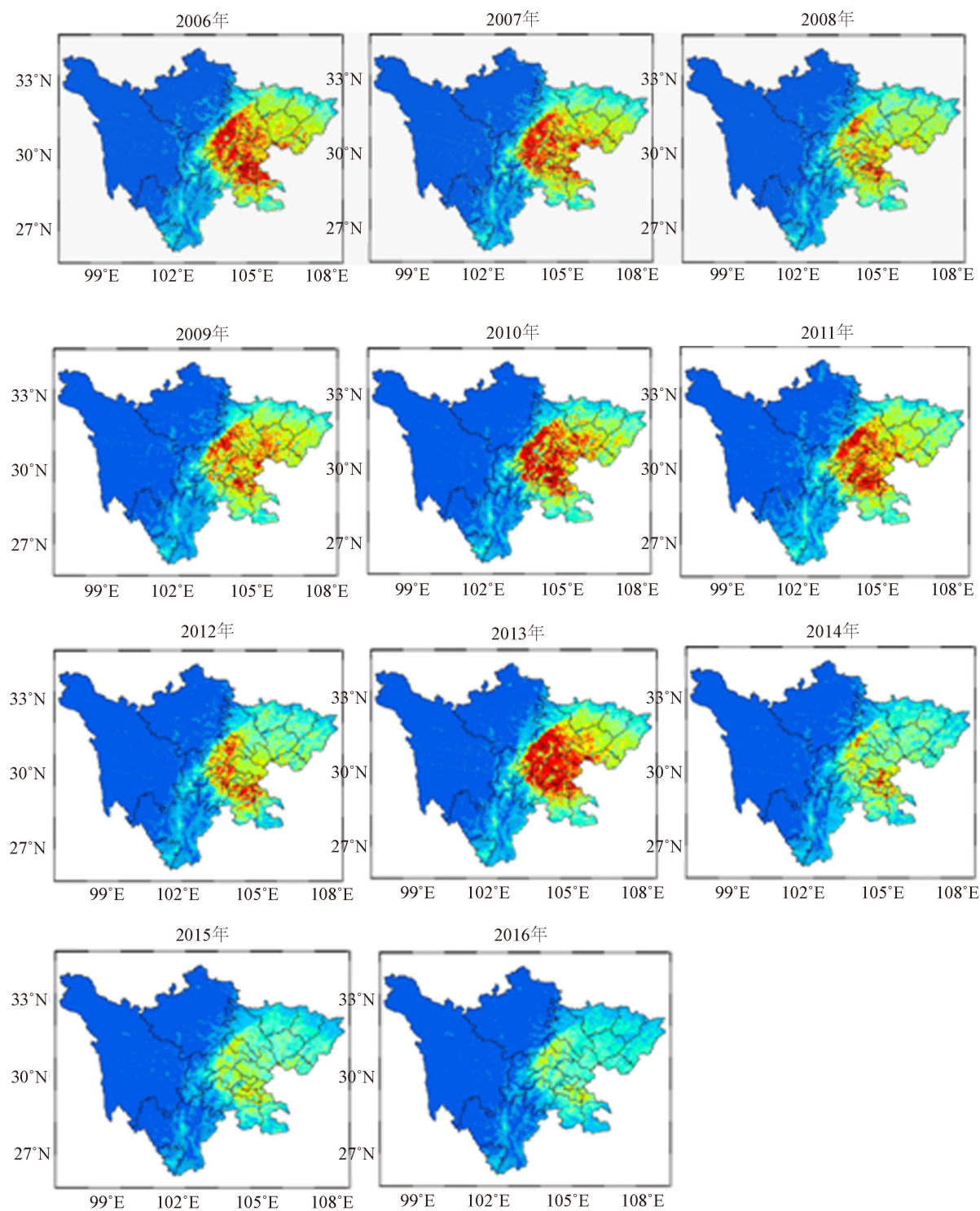


Figure 6. Spatial distribution of annual average AOD over Sichuan Basin during 2006 to 2016

图 6. 2006~2016 年 AOD 空间年际变化

3.2. 四川盆地 AOD 变化和气象要素变化关系

在本研究中讨论了 AOD 与相对湿度、地面风速、降水的关系。

3.2.1. AOD 和相对湿度

图 7 为 2006~2016 年四川盆地主要站点春夏季年均降水、平均风速、相对湿度三者变化。夏季相对湿度高于春季相对湿度，夏季气溶胶在夏季高温高湿的环境下吸收空气中的水汽凝结成核。夏季相对湿度变化和夏季 AOD 均值成正比，2009~2010、2011~2012 平均相对湿度增加，AOD 值增加；2010~2011、2013~2016 平均相对湿度下降，AOD 值下降。春季 2006~2012 年相对湿度和 AOD 值呈反比，2012~2016 年相对湿度和 AOD 值呈正比。有研究表明，一定湿度范围内，相对湿度是影响光学厚度的重要气象因素，大气气溶胶中大部分云凝结核吸湿性很强，且人类活动导致含量明显增加。

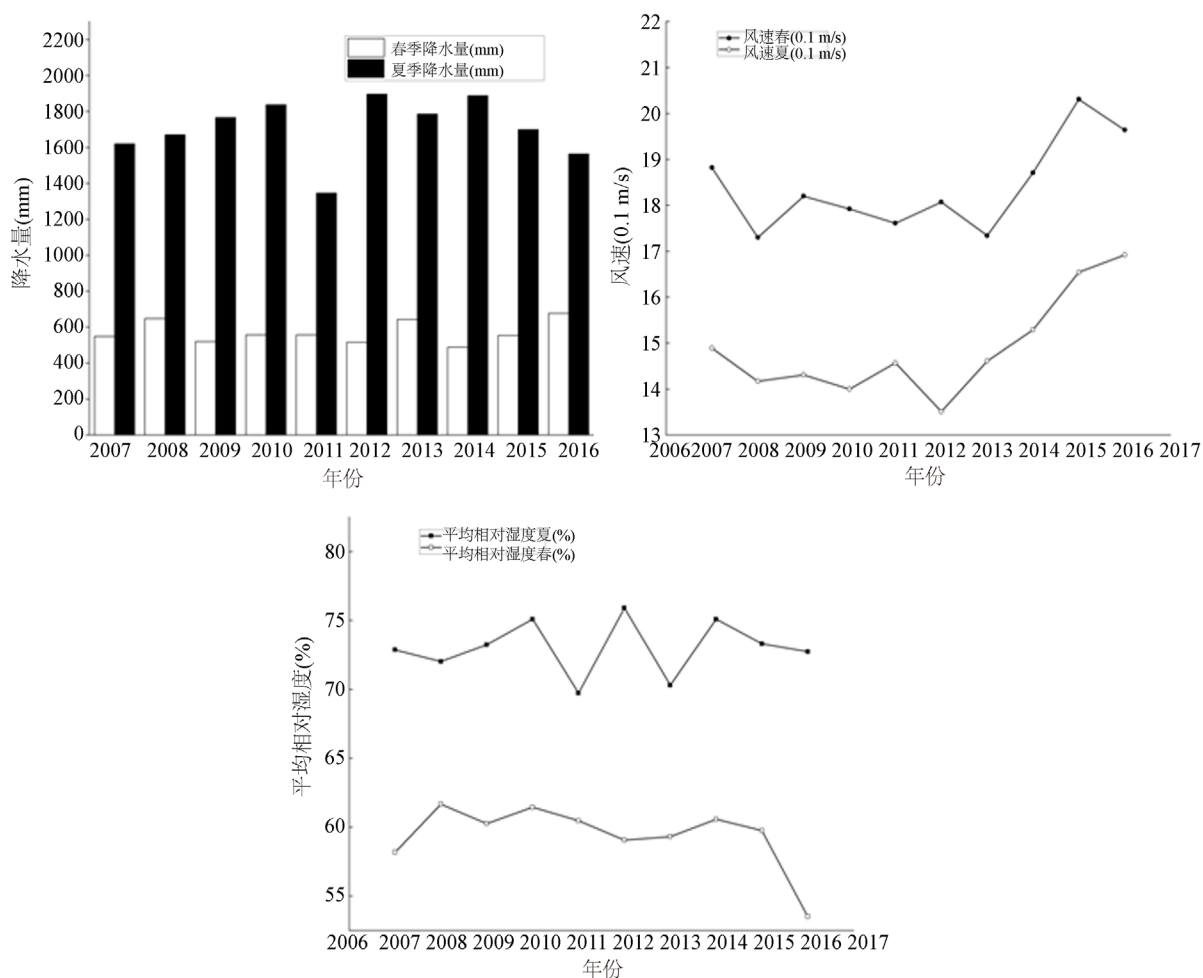


Figure 7. Variation of annual average of meteorological factors (precipitation, relative humidity and speed) during 2006 to 2016

图 7. 2006~2016 年气象要素(降水量、风速、相对湿度)年均变化

3.2.2. AOD 和降水

气溶胶和降水的关系复杂，气溶胶浓度增加会降低云滴有效粒子半径，抑制降水；其次降水会湿沉降气溶胶粒子清除气溶胶。夏季降水和春季降水和 AOD 值变化成正比，降水会湿沉降气溶胶，气溶胶通过两种方式间接影响降水[10]。一种增加云中凝结核云有效粒子半径减小导致气溶胶光学厚度增加；另一种造成有效粒子半径减小抑制降水。四川盆地气溶胶粒子增多云中的凝结核增加，云滴有效粒子半径增加，减少云水路径，导致降水减少。故四川盆地降水机制复杂，AOD 与降水相关性低。

3.2.3. AOD 和风速

如图所示,四川盆地风速春夏季地面平均风速年均值小于 2 m/s 为静风区。风速对污染物的影响主要影响其分布和扩散速度而四川盆地常年为静风区,盆地内污染物不宜扩散故四川盆地的低风速对 AOD 的影响并不大。

4. 结果与讨论

4.1. 结果

a) 四川盆地 AOD 均值具有明显的年际变化特征, AOD 年均值在 0.6 和 1.0 之间波动,整体上呈波动减小,表现为“M”型变化趋势。即 2007~2010 年增大,2010 年达到峰值后下降,2013 年再次达到峰值,2013~2016 年下降。

b) 四川盆地 AOD 月均值变化在 0.2~1.1 之间,整理呈“双峰型”变化周期。第一个峰值在春季,第二个在夏季。表现为 1~3 月逐月增加达到第一个峰值,4~7 月逐月下降,8~9 月逐月增加达到第二个峰值,10~12 月下降。

c) 四川盆地 AOD 空间变化特征为沿着四川盆地山脉地形走向分布,呈盆地西部向东部减少,中部向四周减少的变化特征。海拔低的地区 AOD 值大,海拔高的地区 AOD 值小。

d) 四川盆地 AOD 季节变化特征为 AOD 值从大到小一次依次为春季、夏季、秋季、冬季。因春季四川盆受到沙尘和秸秆燃烧的影响, AOD 值较高,夏季高温高湿气溶胶吸收水分成云致雨仍然维持较高水平,冬季四川盆地温度低,有时会出现逆温层大气层结稳定,不利于污染物扩散。

e) 四川盆地 AOD 与相对湿度呈正相关,与降水和风速并无明显的关系。

4.2. 讨论

本研究分析了 2006 年至 2016 年四川盆地 AOD 年均变化趋势,2013 年国务院颁布了“大气十条”,2013 年后四川盆地 AOD 值明显下降,我们可以认为“大气十条”的颁布与实施对四川盆地的污染防治是起到积极作用的。但是气溶胶与云的微物理过程是十分复杂,并且已有理论是否适用于具有不同热力、动力和水汽背景的其他区域仍然有待验证。且四川盆地气溶胶与云的相互作用的主导机制是否与其他地区研究结论一致是仍然需要不断研究的问题。利用多种相关性分析方法可以对四川盆地气溶胶与云、降水的间接效应进行细致分析,以加深对四川盆地云微物理特性对气溶胶敏感性及其它们后续对降水的作用的了解。

基金项目

国家级大学生创新创业计划(201810621019)。

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): 826-8840.
- [2] 杨慧玲,肖辉,洪延超. 气溶胶对冰雹云物理特性影响的数值模拟研究[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 445-460.
- [3] 刘婷,黄兴友,高庆先,等. 不同气象条件下气溶胶时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, 26(2): 122-128.
- [4] 罗宇翔,陈捐,郑小波. 近十年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 876-883.
- [5] 晏利斌,刘晓东. 京津冀地区气溶胶季节变化及与云量的关系[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8): 924-931.
- [6] Nakajima, T.Y. and Nakajima, T. (1995) Wide-Area Determination of Cloud Microphysical Properties from NOAA AVHRR Measurements for FIRE and ASTEX Regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **52**, 4043-4059.

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<4043:WADOCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<4043:WADOCM>2.0.CO;2)

- [7] Tang, J., Wang, P., Mickley, L.J., *et al.* (2014) Positive Relationship between Liquid Cloud Droplet Effective Radius and Aerosol Optical Depth over Eastern China from Satellite Data. *Atmospheric Environment*, **84**, 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.024>
- [8] Mahowald, N.M., Engelstaedter, S., Luo, C., *et al.* (2014) Atmospheric Iron Deposition: Global Distribution, Variability, and Human Perturbations. *Annual Review of Marine Science*, **1**, 245-278. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163727>
- [9] Li, Z., Niu, F., Fan, J., *et al.* (2011) Long-Term Impacts of Aerosols on the Vertical Development of Clouds and Precipitation. *Nature Geoscience*, **4**, 888-894. <https://doi.org/10.1038/ngeo1313>
- [10] 石睿, 王体健, 李树, 等. 东亚夏季气溶胶-云-降水分布特征及其相互影响的资料分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 12-22.
- [11] 陈宇. 基于卫星资料的沙尘气溶胶对西北地区云微物理特性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [12] 吴篷萍, 周长春. 四川盆地秋季气溶胶与云的相关性分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(2): 59-63.
- [13] 王银牌, 喻鑫, 谢广奇. 中国近 5 年气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 426-434.
- [14] 罗云峰, 吕达仁, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均时空分布特征分析[J]. 大气科学, 2002(6): 3-12.
- [15] 何沐全, 刘志红, 张颖, 等. 川南城市群大气灰霾时空分布特征及其成因分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 432-442.
- [16] Remer, L.A., Mattoo, S. and Levy, R.C. (2013) Modis 3 km Aerosol Product: Algorithm and Global Perspective. *Atmospheric Measurement Techniques*, **6**, 1829-1844. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1829-2013>
- [17] 王家成, 朱成杰, 朱勇, 等. 北京地区多气溶胶遥感参量与 PM_{2.5} 相关性研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 1947-1956.
- [18] Kaskaoutis, D.G., Kambezidis, H.D., Hatazianastassiou, N., *et al.* (2007) Aerosol Climatology: Dependence of the Angstrom Exponent on Wavelength over Four AERONET Sites. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, **7**, 7347-7397. <https://doi.org/10.5194/acpd-7-7347-2007>
- [19] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用 MODIS 遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 1-7.
- [20] 冯小琼, 陈军辉, 朱雨蒙, 等. 气象因素对成都主要大气污染物影响的非参数分析[J]. 四川环境, 2017, 36(1): 30-34.